

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zvýšení podílu spalování koksárenského plynu v kotli
s granulačním ohništěm

Increase the Share of Coal Gas Combustion in the Boiler
with Dry Fire

Student:

Vedoucí bakalářské práce:

Jiří Bernát

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Bernát**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Zvýšení podílu spalování koksárenského plynu v kotli s granulačním ohništěm.**
Increase the Share of Coal Gas Combustion in the Boiler with Dry Fire

Zásady pro vypracování:

Navrhněte úpravu kotle o jmenovitém výkonu 75 t/h páry pro kombinované spalování směsi černého uhlí a koksárenského plynu pro zvýšený podíl spalování plyného paliva.

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte popis spalovacího zařízení a plynového hospodářství teplárny.
2. Navrhněte možné varianty řešení zvýšení podílu koksárenského plynu.
3. Proveďte výpočet účinnosti kotle při spalování uhlí a plyného paliva.
4. Proveďte zhodnocení technického a ekonomického přínosu navrhovaného řešení.

Grafická část bude obsahovat schéma plynového hospodářství vybrané teplárny.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČERNÝ, V. a kol. *Parní kotle a spalovací zařízení*. SNTL Praha, 1975.
KOLAT, P. *Přenos tepla a hmoty*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1986.
DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Skripta ČVUT Praha, 2005.
Zprávy katedry energetiky z měření kotlů v Teplárně Přívoz.

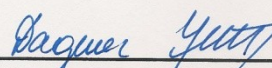
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

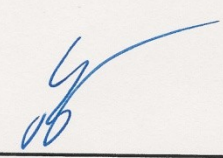
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takové případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jiří Bernát

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Sarajevova 1
Ostrava – zábřeh
700 30

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BERNÁT, J. *Zvýšení podílu spalování koksárenského plynu v kotli s granulačním ohništěm: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2013, 52 s. Vedoucí práce: Čech, B.

Tato bakalářská práce se zabývá úpravou kotle K2 v závodě Teplárna Přívoz. V úvodu jsou srovnány dostupné technologie spojené s problematikou kotlových zařízení. Další část je věnována popisu současného stavu spalovacího zařízení, popisu plynového hospodářství teplárny a návrhům možných variant řešení pro úpravu kotle. Tyto varianty jsou v další kapitole porovnány a u vybrané varianty je sepsán technický popis řešení jednotlivých úprav na kotli. V další části je pro vybranou variantu proveden výpočet účinnosti kotle při spalování uhlénoho i plynného paliva. V poslední části je provedeno ekonomické zhodnocení jednotlivých variant řešení. Schéma plynového hospodářství teplárny je součástí přílohy bakalářské práce.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BERNÁT, J. *Increase the Share of Coal Gas Combustion in the Boiler with Dry Fire: Bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetic, 2013, 52 p. Thesis head: Čech, B.

This bachelor thesis is dealing with the modification of the K2 boiler in the Přívoz heating plant. At the beginning there is a comparison of the available technologies in connection with the issue of the boiler systems. The following part is devoted to the description of the current state of the combustion machinery, a description of the heating plant's gas management and proposals of possible solution of the boiler modifications. These proposals are compared in the next chapter which includes technical descriptions of the boiler modification proposals. The next part deals with the calculation of the boiler efficiency using both coal and gas fuel. The final part is devoted to the economic evaluation of the proposed solutions. The heating plant's gas management chart is included in the Annex of the bachelor thesis.

Obsah

1. Úvod	11
2. Odborný úvod ke zkoumané tématice	12
2.1 Kotle.....	13
2.1.1 Roštové kotle	13
2.1.2 Fluidní kotle.....	14
2.1.3 Práškové kotle.....	16
2.2 Paliva.....	20
2.2.1 Pevná paliva.....	20
2.2.2 Kapalná paliva	22
2.2.3 Plynná paliva.....	23
3. Popis současného stavu	25
3.1 Popis kotle K2	26
3.1.1 Technické parametry kotle.....	27
3.1.2 Technické parametry hořáku	28
3.1.3 Parametry komínu.....	28
3.2 Paliva a jejich parametry	28
3.2.1 Černé uhlí a proplástek	28
3.2.2 Zemní plyn a Koksárenský plyn	30
3.3 Popis plynového hospodářství teplárny	31
3.3.1 Přívod koksárenského plynu	32
3.3.2 Přívod zemního plynu.....	32
3.3.3 Regulace a měření.....	32
3.3.4 Přerušování dodávky koksárenského plynu.....	33
3.3.5 Čištění plynového potrubí.....	33
4. Popis možných variant řešení	34
4.1 Varianta č. 1	34
4.2 Varianta č. 2	35
5. Popis vybrané varianty č. 2	36
5.1 Varianta č.2A	36
5.2 Varianta č.2B.....	36

5.2.1	Umístění hořáků na kotli.....	37
5.2.2	Regulace výkonu nových plynových hořáků.....	39
5.2.3	Regulace vzduchu do plynových hořáků	39
6.	Technické a ekonomické zhodnocení navržené varianty	39
7.	Výpočet účinnosti kotle	41
7.1	Výpočet účinnosti kotle pro spalování černého uhlí	41
7.1.1	Stechiometrie	41
7.1.2	Výpočet tepelných ztrát	43
7.2	Výpočet účinnosti kotle pro spalování koksárenského plynu	47
7.2.1	Stechiometrie	48
7.2.2	Výpočet tepelných ztrát	49
8.	Závěr.....	51
9.	Použitá literatura.....	52
10.	Přílohy.....	52

Seznam značení

Použité veličiny

Značka	Jednotka	Veličina
a_1	$[\text{kg.kg}^{-1}]$	Podíl uhlíku paliva, spáleného na CO
b	$[\text{kg.kg}^{-1}]$	Podíl nespáleného uhlíku paliva
C	$[\text{kg.kg}^{-1}]$	Obsah uhlíku
c, c_s	$[\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}]$	Střední měrná tepelná kapacita spalin
i	$[\text{J.m}^{-3}]$	Entalpie vztažená na 1 m^3
I	$[\text{J.kg}^{-1}]$	Entalpie vztažená na 1 kg
m	$[\text{kg}]$	Hmotnost
p	$[\text{Pa}]$	Tlak
P	$[\text{W}]$	Výkon, Příkon
Q_i	$[\text{J.kg}^{-1}]$	Výhřevnost paliva
t	$[\text{°C}]$	Teplota
V	$[\text{m}^3.\text{kg}^{-1}]$	Objem vzduchu nebo spalin vztažený na 1 kg paliva
W	$[\text{kg.kg}^{-1}]$	Poměrný obsah vody v palivu
X	$[\text{kg.kg}^{-1}]$	Hmotnostní podíl složky tuhých zbytků
n	$[1]$	Součinitel přebytku vzduchu
α	$[1]$	Součinitel přebytku vzduchu na výstupu za kotlem
Z	$[1]$	Relativní tepelná ztráta
η	$[1]$	Účinnost
v	$[1]$	Součinitel respektující zvětšení objemu suchého vzduchu v důsledku vlhkosti
ρ	$[\text{kg.m}^{-3}]$	Měrná hmotnost
ω	$[\text{m}^3.\text{m}^{-3}]$	Objemový podíl složky ve směsi plynů

Použité indexy

Index	Význam
0	Počáteční; základní, vstupní
a	Analytický
Ar	Argon
C	Uhlík; hořlavina v tuhých zbytcích
c	Celkový
CO	Oxid uhelnatý; hořlavina ve spalínách
CO₂	Oxid uhličitý
H₂	Vodík
H₂O	Voda; vodní pára
i	Složka směsi; člen souboru
in	Vstupní; vnitřní
N₂	Dusík
O₂	Kyslík
pal	Palivo; přivedeno palivem
pop	Popílek
SK	Skutečný
sk	Škvára; struska
SO₂	Oxid siřičitý
spal	Spalitelný
sp	Spaliny
sv	Sdílení tepla do okolí
t	Teoretický (minimální)
vyr	Vyrobený (výkon)
vz	Vzduch
w	Voda, vodní pára
z	Ztráty

Použité exponenty

Exponent	Význam
d	Sušina, suchý stav
h	Hořlavina (palivo bez vody a popela)
r	Surový stav
s	Suchý
v	Vlhký

Použité zkratky

Zkratka	Význam
EK	Ekonomizérová komora
EKO	Ekonomizér (ohřívák vody)
EO	Elektroodlučovače
KP	Koksárenský plyn
SK	Spalovací komora
TG	Turbogenerátor
TPV	Teplárna přívoz
VMH	Výtopna Mariánské hory
ZP	Zemní plyn

1. Úvod

Společnost Dalkia Česká republika je dlouholetým výrobcem a dodavatelem tepelné energie pro Statutární město Ostrava. Dalkia provozuje v Ostravě celkem tři závody: Závod Elektrárna Třebovice, Závod Teplárna Přívoz (dále jen TPV) a Závod Distribuce a služby.

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou v závodě TPV, která disponuje čtyřmi kotli K1 až K4 o celkovém tepelném výkonu 245,6 MW a elektrickém výkonu 13,5 MW. Z důvodu, že TPV je situována hned vedle Koksovny Svoboda, tak odebírá z koksovny veškeré přebytky koksárenského plyn. Průměrné množství odebíraného plynu odpovídá 15 000 m³/h. Toto požadované množství plynu lze spálit pouze při souběžném provozu kotlů K1 a K4. Jelikož pouze kotle K1 a K4 jsou upraveny tak, aby byly schopny spalovat koksárenský plyn v takovémto množství, není zajištěna žádná záloha v případě nahodilých či plánovaných odstávek. Proto záměrem Dalkia ČR je provést úpravy na kotli K2 tak, aby byla zajištěna 100 % záloha pro kotel K1 nebo K4 z důvodu odstávek. Oba kotle K1 i K4 mají při spalování koksárenského plynu v letním období výkon 40 MW_t, který zajišťují čtyři plynové hořáky po 10 MW_t na kotel. Hlavním cílem je navrhnout vhodné úpravy pro kotel K2 tak, aby tento kotel mohl být provozován pouze na koksárenský plyn do definovaného výkonu 40 MW_t a zároveň, aby mohl být tento kotel provozován v režimu spoluspalování koksárenského plynu a uhlí jak je tomu u kotlů K1 a K4.

Při řešení problému úprav kotle K2 za účelem zvýšení podílu spalování koksárenského plynu jsem navrhl dvě koncepční varianty řešení. První varianta se zabývá možností úpravy stávajících hořáků za účelem zvýšení jejich výkonu. Výstupní trysky pro spalování koksárenského a zemního plynu jsou rozmístěny po obvodu hořáků. Pro spalování koksárenského plynu je použito 12 trysek a pro spalování zemního plynu je použito 6 trysek. Následná úprava spočívá v tom, že trysky pro spalování zemního plynu se upraví k využití spalování koksárenského plynu. Výkon hořáku při spalování koksárenského plynu by se měl zvýšit o 50 %.

Druhá varianta spočívá v zachování tří stávajících kombinovaných hořáků bez jakýchkoliv úprav a instalací dvou nových hořáků pouze na koksárenský plyn do bočních stěn spalovací komory.

2. Odborný úvod ke zkoumané tematice

Kotel je zařízení, které slouží k ohřevu jiného média. Nejčastějším médiem je voda, ze které získáme tlakovou páru pro energetické účely. Teplo potřebné k ohřevu vody získáme spalováním paliva. Kotle dělíme podle použitého paliva, podle způsobu spalování a podle přetlaku vyrobené páry.

Dělení podle použitého paliva:

- Kotle na tuhá paliva
- Kotle na kapalná paliva
- Kotle na plynná paliva
- Kotle na směsi paliv

Dělení podle způsobu spalování:

- Kotle roštové (s klasickým roštem)
- Kotle fluidní (s fluidním roštem)
- Kotle práškové (s granulačním nebo výtavným roštem)

Dělení podle přetlaku vyrobené páry:

- | | | |
|---------------------|----------------|-----|
| • Nízkotlaké kotle | od 0 do 0,07 | MPa |
| • Středotlaké kotle | od 0,07 do 6,4 | MPa |
| • Vysokotlaké kotle | 6,4 a výše | MPa |
| • Nadkritické kotle | nad 22,5 | MPa |

Kotle s nadkritickými parametry se dělí podle způsobu zatížení na kotle špičkové, pološpičkové a základní.

Dále ještě kotle můžeme rozdělit podle proudění vody na kotle s velkým vodním obsahem a malým vodním obsahem. Charakteristickým znakem kotlů s velkým vodním obsahem je, že proudění spalin probíhá uvnitř plamenců a žárových trubek, zatímco ohřívána voda proudí vně trubek. Nevýhodou těchto kotlů je, že nemají cirkulační okruh. Proto moderní kotle jsou s malým obsahem vody tzv. kotle vodotrubné. Voda proudí uvnitř trubek parního generátoru a spaliny naopak proudí vně trubek.

2.1 Kotle

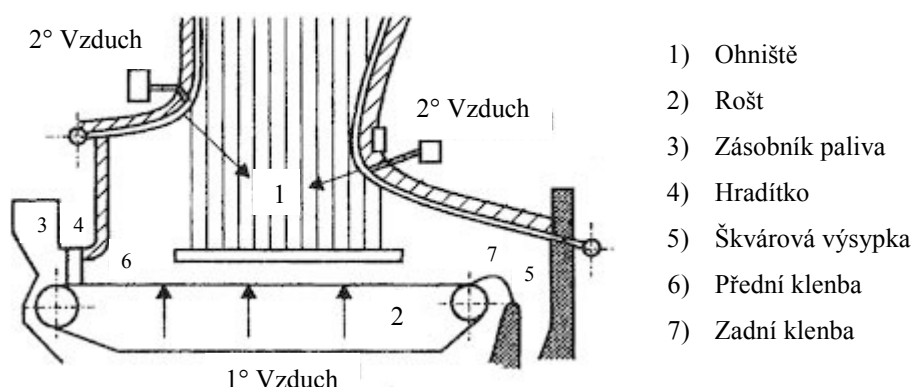
Je to systém mnoha zařízení, jako jsou ohniště, výhřevné plochy, rozvody spalovacího vzduchu (primární, sekundární a terciální vzduch), systém úpravy a dopravy paliva, mlýny, parní generátor atd. Dochází zde k transformaci chemické energie v palivu na tepelnou energii pracovního média.

Dělení kotlů podle pracovního média:

- Parní kotle – Přeřhřátá pára s parametry 10-14 MPa a 450 – 550 °C
- Horkovodní kotle – Horká voda o tlaku nad 0,2 MPa a teplotě nad 115°C

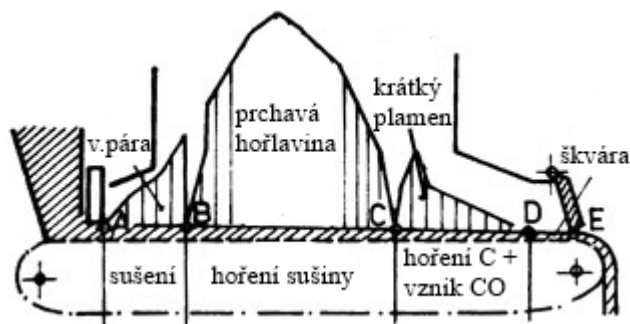
2.1.1 Roštové kotle

Dochází ke spalování kusového paliva, které leží na roštu ve vrstvě. Tloušťka vrstvy závisí na tepelném výkonu ohniště a na prodyšnosti vrstvy spalovacím vzduchem. Granulometrie u roštových ohnišť je větší než 10 mm. Tyto kotle mají využití jak v průmyslu, tak i v domácnostech. V současnosti se roštové kotle na uhlí už moc nestaví, ale velké množství je v provozu. Nové roštové kotle se staví především pro spalování biomasy (dřevní štěpka, piliny, sláma) a pro spalování průmyslových a komunálních odpadů. Základní části roštového ohniště jsou zobrazeny na obr.č.2.1.



Obr.č.2.1 Základní části roštového ohniště [1]

Palivo prochází na roštu čtyřmi fázemi (viz.obr.č.2.2).



Obr.č.2.2 Fáze spalování paliva na roštu [2]

Sušení – Dochází k ohřívání paliva na cca 120 °C a následnému vypařování vody.

Odplyňování – Dochází k ohřátí paliva na cca 250 °C a následnému uvolnění prchavé hořlaviny.

Hoření – Dochází k hoření prchavé hořlaviny a zapálení vrstvy tuhé hořlaviny.

Dohořívání – Dochází k dohoření tuhé fáze a k ochlazení tuhých zbytků.

Maximální teplota v ohništi u roštových kotlů se pohybuje v rozmezí od 1 350 °C do 1 450 °C pro spalování uhlí a pro spalování biomasy od 1 000 °C do 1 300 °C.

Druhy roštů:

- Rošty s nehybnou vrstvou paliva (pevný rošt).
- Rošty s občasným přemísťováním paliva (stupňový a přesuvný rošt).
- Rošty s trvalým přemísťováním paliva (pásový a řetězový rošt).

Hlavní funkcí roštu je zajistit přívod spalovacího vzduchu do jednotlivých vrstev paliva.

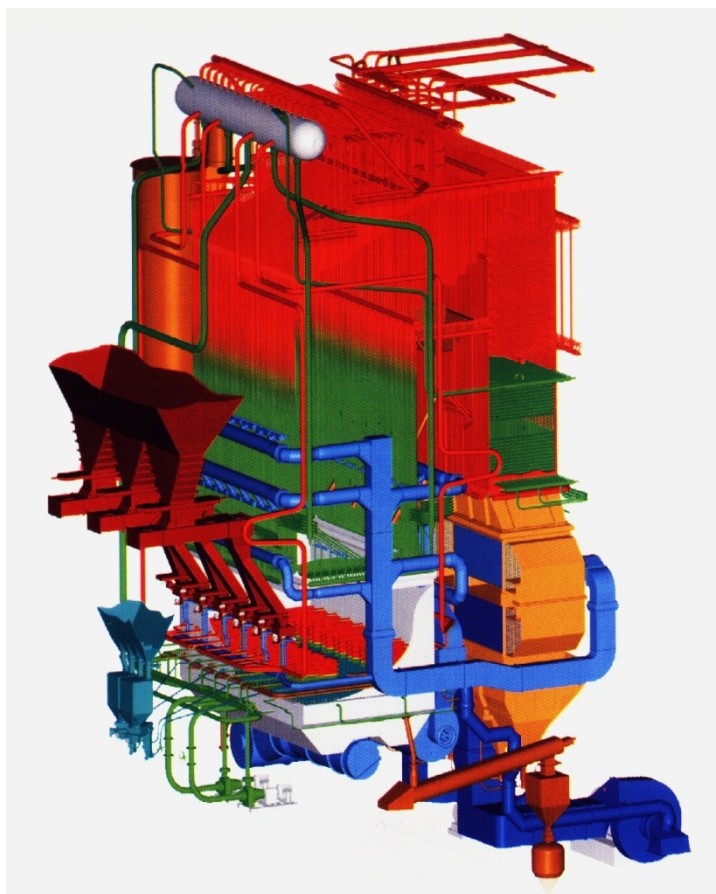
2.1.2 Fluidní kotle

Palivo je spalováno ve vzhledu díky nadnášení proudy vzduchu. Palivo se do kotle přivádí pneumaticky nebo šnekovitým podavačem do spodní části kotle. Větší části paliva jsou spalovány ve spodní části spalovacího prostoru, který je zúžený a rychlost vzduchu v tomto místě je vyšší. Částičky paliva, popílek a tuhé zbytky jsou unášeny spalinami pryč z ohniště. Spalovací teplota se pohybuje od 700 °C do 900 °C, aby nedocházelo ke spékání popela. Granulometrie u fluidních kotlů se pohybuje v rozsahu 0 až 6 mm.

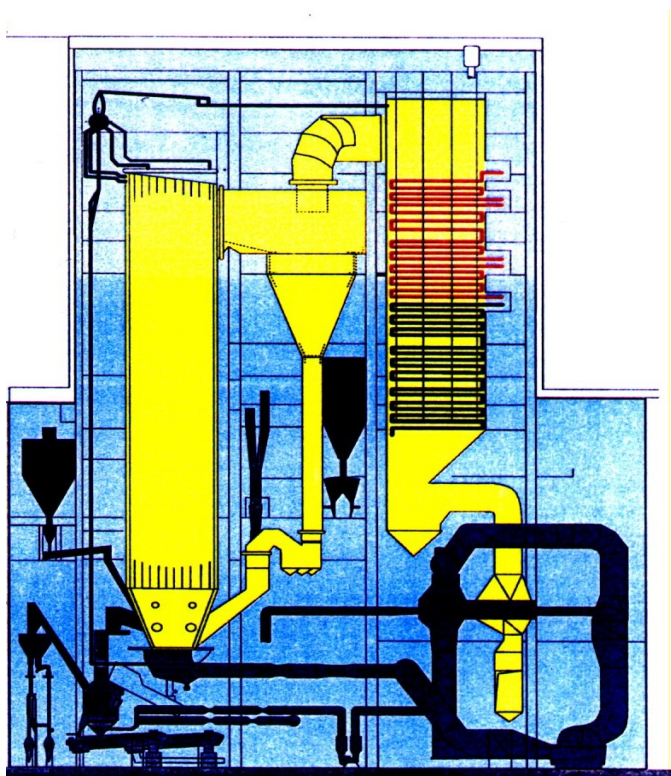
Fluidní kotle se dělí na dva základní typy:

- Kotel se stacionární fluidní vrstvou (viz.obr.č.2.3).
- Kotel s cirkulující fluidní vrstvou (viz.obr.č.2.4).

U kotlů se stacionární fluidní vrstvou dochází ke spalování ve vzhledu s rozeznatelnou hladinou vrstvy, zatímco u kotlů s cirkulující fluidní vrstvou částice obíhají přes cyklón zpět do ohniště, dokud nevyhoří. Díky víření částic ve fluidní vrstvě je přestup tepla do výhřevné plochy mnohem intenzivnější. Součinitel přestupu tepla se pohybuje od 200 do 800 W·m⁻²·K⁻¹.



Obr.č.2.3 Kotel se stacionární fluidní vrstvou (elektrárna Komořany) [4]



Obr.č.2.4 Kotel s cirkulující fluidní vrstvou (elektrárna Tisová) [4]

Výhody fluidních kotlů:

- Nízké teploty ve fluidní vrstvě mají příznivý dopad na redukci NO_x ve spalinách.
- Účinnost odsíření spalin se pohybuje od 40 do 95 % kvůli možnosti dávkování vápence do kotle. Nemusí se instalovat odsiřovací zařízení.
- V kotlích s fluidní vrstvou můžeme spalovat paliva a odpady s velmi malou výhřevností, což u jiných typů kotlů není možné.
- Díky nižší teplotě spalin mají fluidní kotle menší komínovou ztrátu. Účinnost fluidních kotlů je mezi 92 až 94 %.
- Menší rozměry roštů oproti jiným roštovým kotlům.

Nevýhody fluidních kotlů:

- Musí se více dbát na granulometrii paliva než u roštových kotlů.

2.1.3 Práškové kotle

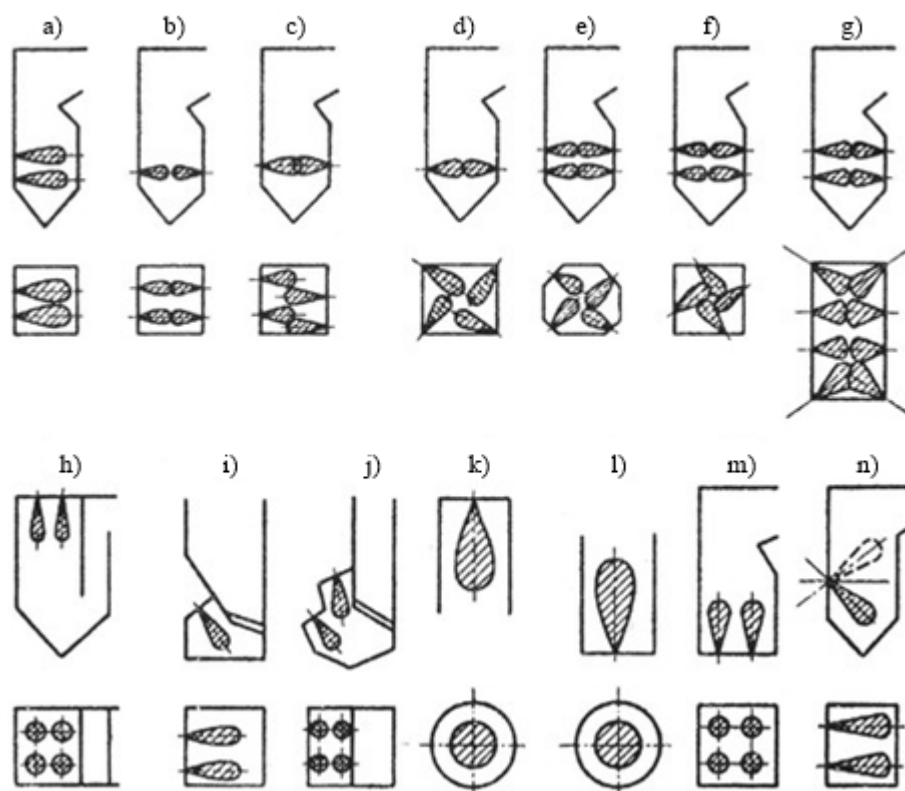
Výstavba práškových kotlů je u vysokých jmenovitých výkonů tj. nad 40 MWt. Palivem je jemně mletý uhlý prášek dopravovaný mlýny do spalovacího prostoru. Dopravování probíhá pneumaticky a nosným médiem jsou spaliny nebo primární spalovací vzduch. Granulometrie u práškových kotlů je menší než 1 mm, tím se zvětší povrch paliva až 200 krát. Doba setrvání paliva v ohništi je cca 1 až 3 vteřiny.

Nevýhodou jsou vyšší investiční náklady a vysoká vlastní spotřeba energie kvůli výstavbě mlecího okruhu. Také dochází k zanášení výhřevných ploch popílkem. Spalovací vzduch se musí předeheřt cca na 300 až 450 °C. U práškových kotlů se používají různé varianty umístění hořáků na kotlích (viz.obr.č.2.5).

Prášková ohniště se konstruují ve dvou variantách. Spalování prášku může probíhat za relativně nízkých teplot v ohništi, takže struska následně odchází z ohniště v tuhém stavu. Tento typ práškového ohniště se nazývá granulačním ohništěm, někdy také ohništěm se suchým odvodem strusky. U druhého typu práškových ohnišť se spaluje prášek při vyšších teplotách, takže popel zachycený v ohništi následně opouští spalovací prostor ve formě tekuté strusky. Taková ohniště se nazývají výtavná.

Dělení práškových kotlů podle typu ohniště:

- Granulační ohniště
- Výtavná ohniště
- Cyklónová ohniště

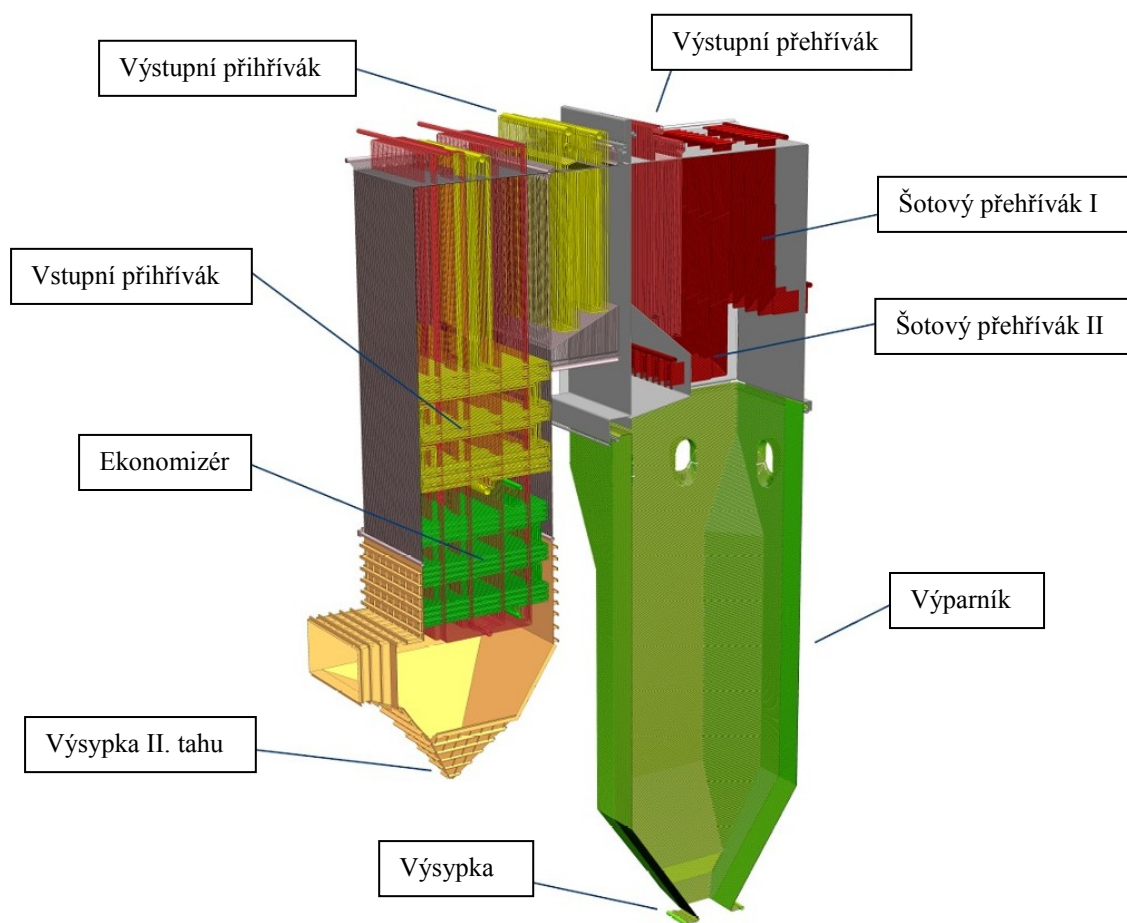


Obr.č.2.5 Varianty umístění hořáků na kotlích [3]

a) dvouřadé čelní ; b) jednořadé protiběžné ; c) jednořadé vystřídání ; d) jednořadé rohové (tangenciální) ; e) dvouřadé rohové (tangenciální) ; f) dvouřadé rohové (tangenciální) ; g) dvouřadé kombinované ; h, k) stropní ; i, j) uspořádání v čelní stěně u výtavných ohnišť ; l) naklápěcí

2.1.3.1 Granulační ohniště

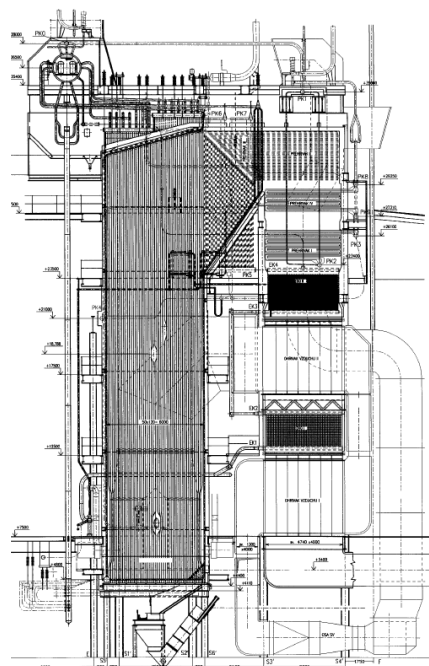
Tvar granulačního ohniště je svislý hranol s charakteristickým zúžením ve spodní vrstvě (viz.obr.2.6). Tomuto zúžení se říká výsypka, kde dochází k odvodu tuhých zbytků po spálení. Hořáky mohou být instalovány kdekoli, kromě dna ohniště. Spalovací teplota se pohybuje mezi 1 100 až 1 500 °C. Spalovací komora musí být dostatečně chlazená, aby nedošlo k překročení teploty tečení popele. Pro tato ohniště máme široký výběr paliv. Nejčastěji se používají ke spalování méněhodnotná paliva (hnědé uhlí a lignit) a paliva s vysokým a středním obsahem prchavé hořlaviny. U granulačních ohnišť jsou nižší nároky na úpravu paliva, díky tomu se používá méně energeticky náročný mlecí okruh s přímým foukáním.



Obr.č.2.6 Kotel s granulačním ohništěm [4]

2.1.3.2 Výtavné ohniště

Ve výtavných ohništích dochází ke spalování paliva při vyšších teplotách, než je tomu u granulačních ohnišť. Díky vysokým teplotám dochází k překročení teploty tečení popele a následnému odtoku tekuté strusky z kotle. Výtavné kotle jsou buď jednoprostorové, nebo dvouprostorové (viz.obr.2.7). Důležitou částí výtavných ohnišť je vychlazovací prostor. Tento prostor slouží k ochlazení spalin, aby částičky strusky unášené spalinami ztuhly a nenalepovaly se na výhřevné plochy. Výsypka je na rozdíl od granulačních ohnišť vodorovná, popřípadě má mírný sklon. Tudy struska odtéká do nádrže



Obr.č.2.7 Kotel s výtavným ohništěm [4]

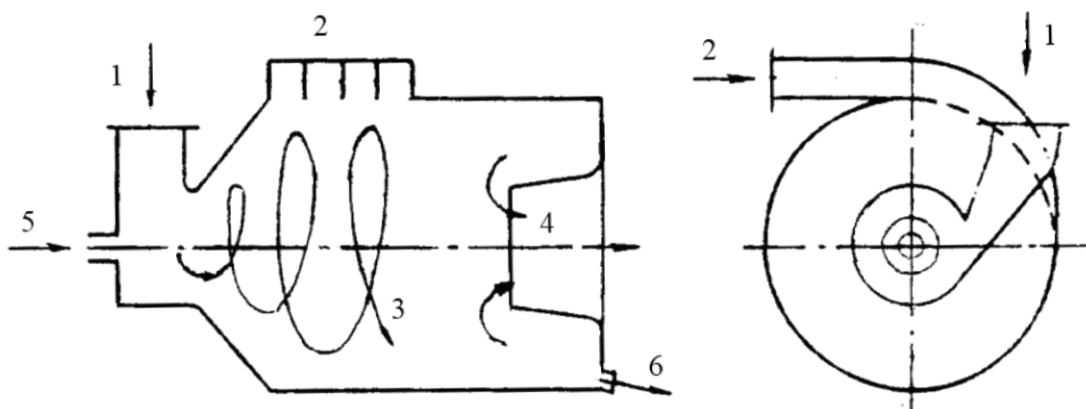
naplněné vodou, kde dojde k rychlému ochlazení a rozpadu na struskový písek.

Srovnání výtavného a granulačního ohniště:

- Výhodou u výtavných ohnišť je vyšší stupeň zachycení popele přímo v ohništi cca 40 až 70 %.
- Výhodou granulačních ohnišť je větší regulační rozsah než u výtavných ohnišť díky nebezpečí tuhnutí strusky v okolí výtakového otvoru. Regulace u granulačních ohnišť je cca 30 až 100 %, u výtavných ohnišť je cca 60 až 100 %.
- Další nevýhodou výtavných ohnišť je vysoká teplota spalování, při které dochází k odpařování části popelovin a ty pak kondenzují na plochách kotle, kde způsobují těžko odstranitelné nánosy.

2.1.3.3 Cyklónová ohniště

Tvar cyklónového ohniště (viz.obr.2.8) je válec s poměrem délky k průměru 1 až 1,3. Směs paliva vstupuje do cyklónu společně s primárním vzduchem přes vířivý hořák, který je umístěn ve středu mírně kuželovitého čela. Sekundární vzduch je přiváděn tangenciálně tryskami, které jsou umístěny na obvodu cyklónu. Tento tangenciální vstup vzduchu způsobuje vířivý pohyb spalín v ohništi. Spaliny se pohybují po spirále a vystupují zúženým otvorem ve středu protilehlého čela cyklónu. Terciální vzduch zajišťuje dospálení částic paliva a je přiváděn do cyklónu axiálně. Celkový objem spalovacího vzduchu se dělí tak, že 15 až 20 % tvoří vzduch primární, 75 až 80 % tvoří vzduch sekundární a cca 3 až 8 % tvoří vzduch terciální.



Obr.č.2.8 Cyklónové ohniště [11]

- 1) Vstup směsi paliva a primárního vzduchu ; 2) Vstup sekundárního vzduchu ; 3) Pohyb spalín v ohništi ; 4) Výstupní otvor pro spaliny ; 5) Vstup terciálního vzduchu ; 6) Výtakový otvor pro strusku

2.2 Paliva

Základní dělení paliv je podle skupenství na pevné, kapalné a plynné.

Další základní dělení paliv je podle původu:

- Fosilní paliva – uhlí, ropa, zemní plyn
- Obnovitelné – hlavně biomasa
- Odpadní – odpadní plyny, komunální a průmyslové odpady, kaly z čistíren odpadních vod.

2.2.1 Pevná paliva

Mezi základní druhy tuhých paliv patří uhlí (hnědé, černé, proplástek), biomasa, zemědělské, průmyslové a komunální odpady. Každé tuhé palivo se skládá ze tří základních složek. Mezi ně patří voda (W = water), popelovina (A = ash) a hořlavina (h). Součet těchto složek musí dát hodnotu 100 % ($W+A+h = 100$ [hm.%]). Celková hořlavina v palivu se dále dělí na hořlavinu prchavou (V = volatiles) a na hořlavinu neprchavou (FC = fixed carbon).

Způsoby určení složení tuhého paliva:

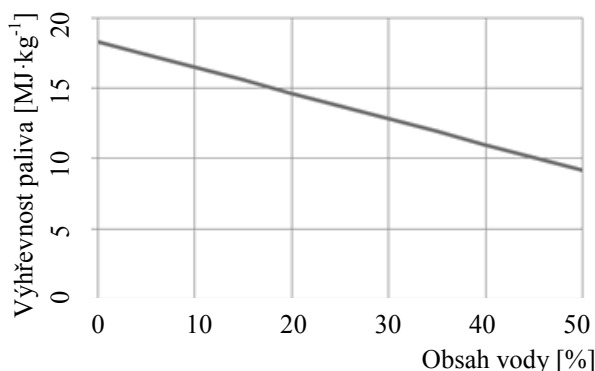
- Hrubý rozbor – tento rozbor slouží k určování poměru mezi hořlavinou (h), popelovinou (A^r) a vodou (W^r) obsaženou v palivu. (viz. tabulka č.2.1).
- Elementární rozbor – při tomto rozboru dochází navíc k určení obsahu prvků hořlaviny.

Přimísena voda	← Surové uhlí →		
	Voda (W ^r)	Popelovina (A ^r)	Hořlavina (h)
balast		Prchavý podíl	Tuhý podíl
		Bezvodé uhlí (sušina)	
← Spálením vznikne →			
Vodní pára		Tuhé zbytky (struska, popílek)	Spaliny

Tabulka č.2.1 Hrubý rozbor tuhého paliva [10]

Voda v palivu:

Každé tuhé palivo obsahuje v určitém množství vodu, která je jednou ze základních charakteristik paliva. Čím je vyšší podíl vody v palivu, tím je nižší energetická hodnota, resp. výhřevnost tohoto paliva (viz.obr.č.2.9). Voda odchází ve formě páry společně se spaliny. Obsah vody závisí na druhu pevného paliva, na místě kde bylo těženo a na jeho samotné úpravě. Zpravidla, čím je palivo geologicky mladší, tím více vody obsahuje.



Obr.č.2.9 závislost výhřevnosti na vlhkosti [10]

Popelovina v palivu:

Popelovina se skládá z minerálních látek jako jsou křemičitany, uhličitany, sírany a další. Spálením tuhého paliva vznikne z popeloviny tuhý zbytek, kterému se říká popel. Popel je tedy netěkavá součást popeloviny a má stejně negativní vliv na výhřevnost paliva jako voda obsažená v palivu.

Hořlavina:

Hořlavina je aktivní část paliva, která při hoření uvolňuje tepelnou energii. Hořlavina obsahuje dva typy prvků, aktivní prvky (C, H, S) a pasivní prvky (N, O), přičemž musí vždycky platit $C+H+S+N+O=1$. Další nedílnou součástí hořlaviny je tzv. prchavá hořlavina, která se uvolňuje při začátku spalování a napomáhá při vzněcování paliva v ohništi. Podíl prchavé a neprchavé hořlaviny se určí koksovací zkouškou.

Výhřevnost a spalné teplo:

- Výhřevnost (Q_i) je množství tepla uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na teplotu okolí za vzniku vody ve formě páry.
- Spalné teplo (Q_n) je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na teplotu okolí za vzniku vodní páry kondenzací.
- Výhřevnost hořlaviny je víceméně konstantní pro určitou lokalitu (viz.tabulka č.2.2).

Palivo	Výhřevnost Q_i^h [kJ·kg ⁻¹]
Dřevo	17 600
Lignit	26 000
Rašelina	24 800
Vysokopecní koks	33 300
Kladenské uhlí	31 000
Svatoňovické uhlí	33 500
Ostravské uhlí	34 400

Tabulka č.2.2 Příklady výhřevností hořlaviny různých paliv [11]

2.2.2 Kapalná paliva

Kapalná paliva, která se používají v energetice, jsou produkty při zpracovávání ropy. Neupravená ropa se používá v energetice jako palivo velmi výjimečně. Nejpoužívanějšími kapalnými palivy jsou topné oleje (viz. tabulka č.2.3). U menších zařízení se používá jako palivo nafta.

Výhody topných olejů:

- Topný olej se snadno vzněcuje.
- Jednoduchá doprava a skladování.
- Lze dosáhnout vyšší účinnosti kotle, díky nízkému přebytku vzduchu při spalování (přbytek vzduchu se pohybuje kolem 1,06 až 1,1).
- Větší možnost regulace kotle od 20 do 100 %.

Druh oleje	Hustota	Složení					Výhřevnost
		[%]					
	[kg·m ³]	C	H	O	N	S	[MJ·kg ⁻¹]
Extra lehký	0,84	85,9	13	0,4	-	0,7	42,7
Lhký	0,88	85,5	12,5	0,8	-	1,2	42,3
Střední	0,92	85,3	11,6	0,6	-	2,5	40,8
Těžký	0,97	84	11	1,1	0,4	3,5	40,2
dehet	1,05	89	6,5	1,7	1,2	0,8	37,7

Tabulka č.2.3 Příklady topných olejů [11]

2.2.3 Plynná paliva

Mezi plynná paliva patří veškeré plyny, které obsahují hořlavé složky (CH_4 , CO , H_2 , C_nH_m). Plynná paliva lze rozdělit do tří skupin podle jejich vzniku.

- Přírodní plyny – Zemní plyn.
- Odpadní plyny – Degazační, vysokopecní a koksárenský plyn.
- Uměle vyrobené plyny – Bioplyn, dřevoplyn a generátorový plyn.

Vlastnosti plynných paliv:

- **Výhřevnost** – Je to nejdůležitější charakteristická vlastnost plynných paliv. Výhřevnosti pro plynná paliva jsou uvedeny níže v tabulce č.2.4.
- **Hustota** – Je dána složením plynu a je důležitým kritériem pro určení spalovacích vlastností a při dopravě plynu.
- **Tlak** – Důležitá veličina při rozvádění plynu potrubím. Rozeznáváme 4. druhy tlaků. Nízký tlak (do 5 kPa), střední tlak (od 0,5 kPa do 0,4 MPa), vysoký tlak (od 0,4 MPa do 4 MPa), velmi vysoký tlak (od 4 MPa).
- **Zápalná teplota** – Je to nejnižší teplota, při které se plyn samovolně zapálí a hoří. Tato teplota se pohybuje kolem 500 – 700 °C.
- **Teplota hoření** – Jedná se o nejvyšší dosažitelnou teplotu plamene při spalování daného plynu. Patří mezi důležité údaje při návrhu spalovací komory.

Plyn	Výhřevnost	Složení						
	Q_i^r	[%]						
	[MJ·kg ⁻¹]	CO ₂	O ₂	C _x H _y	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
Metan	35,7	-	-	-	-	-	100	-
Zemní plyn	35,4	0,1	-	0,7	-	-	98	1,2
Vodní plyn	10,5	6,3	0,2	-	3,8	51	0,5	4
Koksárenský plyn	16,3	2,3	0,8	2,3	6,8	57,5	22,5	7,8
Vysokopecní plyn	3,95	10,5	-	-	28	2,7	0,3	58,3
Generátorový plyn	5,25	5,3	0,2	-	28	13,3	0,6	52,4

Tabulka č.2.4 Příklady plynných paliv + výhřevnost a složení [11]

Zemní plyn

Je to zástupce přírodního paliva a je nejčastěji používaným plynným palivem v energetice. Má proměnlivé složení, ale dominantní složkou je vždycky metan (obvykle 88 – 99,8 %). Nejedovatý plyn bez zápachu. Aby mohlo dojít k identifikaci úniku tohoto plynu, tak se obohacuje o páchnoucí složku. Výhodou při spalování je, že nevzniká popílek a dochází k minimálnímu vzniku emisí SO_x, NO_x a CO_x.

- Použití zemního plynu v domácnostech – Na vaření 50 % domácností.
– Na ohřev a topení 20 % domácností.

Těžba zemního plynu probíhá pod povrchem v různých hloubkách od 30 do 8000 metrů. Ložiska zemního plynu. Ložiska zemního plynu se vyskytují většinou společně s ropnými ložisky.

Koksárenský plyn

Vzniká při výrobě koksu koksováním (karbonizací) černého uhlí při teplotách 1050 až 1100 °C. Složení a vlastnosti koksárenského plynu závisí na druhu použitého černého uhlí při koksování. Aby bylo možno koksárenský plyn dále využít, je třeba ho zbavit následujících složek (dehet, benzol, naftalen, amoniak a sulfan), tím zabráníme korozi trubek a vzniku emisí SO₂. Koksárenský plyn je charakteristického zápachu, hořlavý a díky vysokému podílu oxidu uhelnatého také jedovatý. Výhřevnost se pohybuje od 15 do 18 MJ·kg⁻¹. Podrobnější složení koksárenského plynu viz tabulka č.2.5.

Složka	Podíl [%]
H ₂	46 – 61
CH ₄	21 – 30
N ₂	3 – 13
CO	5 – 8,5
CO ₂	1 – 4
C _n H _m	3 – 7
O ₂	0,4 – 1,7

Tabulka č.2.5 Složení koksárenského plynu [11]

Karbonizace uhlí je nejpoužívanější technologií chemického zpracování uhlí. Uhlí se při karbonizaci zahřívá bez přístupu vzduchu. Látky tvořící hořlavinu při tom částečně destilují, rozkládají se, polymerují a navzájem reagují. Výsledným produktem je koks, dehet, čpavková voda a koksárenský plyn.

3. Popis současného stavu

V současné době je kotel K2 vybaven 3 hořáky typu „STORK Thermeg“, které jsou umístěny v přední stěně kotle (viz.obr.č.3.1). Jsou konstruovány tak, aby spalovali 100 % černého uhlí a při startování a stabilizaci přibližně 25 % zemního nebo koksárenského plynu. Výkon hořáku při spalování černého uhlí je 21,7MW a při spalování plynu 5,4MW.



Obr.č.3.1 Tři čelní hořáky kotle K2 [4]

Záměrem společnosti Dalkia ČR, a.s. je úprava tohoto kotle K2 tak, aby byla zajištěna 100 % záloha pro kotel K1 a K4. Kotle K1 a K4 spalují v letním období určité množství koksárenského plynu, které je ve smlouvě se společností koksovna Svoboda. Aby tento odběr množství plynu byl splněn, musí být v provozu oba kotle K1 i K4 současně. Z tohoto důvodu nemohou být v letním období prováděny plánované ani nahodilé odstávky za účelem údržby kotlů. Proto musí dojít k jisté úpravě kotle K2 tak, aby pomohl kotlům K1 a K4 se spalováním koksárenského plynu a díky tomu pak na kotlích K1 a K4 budou moci probíhat odstávky i v letních obdobích.

3.1 Popis kotle K2

Spalovacím zařízením používaným společností Dalkia ČR, a.s. je strmotrubnatý dvoutahový granulační kotel se sálavým konvekčním přehřívákem. Dále je vybaven ohřívákem vody (ekonomizér) a kapsovým ohřívákem vzduchu. Spalovací vzduch je nasáván z kotelny dvěma ventilátory, následně je vháněn do vzduchového ohříváku a poté přiváděn do kotle vzduchovým systémem.

Palivo je přiváděno do kotle třemi čelními vířivými hořáky, které jsou vybaveny zapalovacím hořáčkem s vlastním hlídačem plamene. Hlavním palivem je černé uhlí a pro najíždění a stabilizaci hoření se používá koksárenský nebo zemní plyn. Každý hořák má vlastní uhlopráškové potrubí vedoucí od jednoho levotočivého tří-kroužkového mlýna typu „FULLER E 38“ (viz.obr.č.3.2). Toto palivo je unášeno primárním vzduchem o teplotě 150 - 80 °C do třídiče aby se dosáhlo požadované jemnosti zrn (10 – 30 mm v průměru). Tato směs paliva a primárního vzduchu je přiváděna do hořáku. Se sekundárním vzduchem se palivo promísí až při výstupu s hořáků do spalovací komory. Regulace sekundárního vzduchu se provádí klapkami. K zajištění dokonalého spalování je přiváděn do kotle ještě terciální vzduch, který je regulován dvoulistou klapkou. Pro dokonalé spalování bývá přebytek vzduchu 1,25 až 1,3 násobek



Obr.č.3.2 Mlýn typu Fuller E 38 [4]

množství vzduchu potřebného k ideálnímu vyhoření všech spalitelných látek obsažených v palivu.

Kotel je dále vybaven elektrostatickým odlučovačem, který je horizontálního třísekčního provedení. Je zařazen za druhým tahem kotle a slouží k odlučování popílku z kouřových plynů. Tyto kouřové plyny jsou následně odsávány axiálním rovnotlakým kouřovým ventilátorem do komína, který je společný pro všechny kotle. Ventilátor je poháněn elektromotorem o výkonu 200 kW a napětí 6000 V, regulace výkonu ventilátoru se provádí natáčením klapky regulačního věnce, který je za oběžným kolem kouřového ventilátoru. V dolní části spalovací komory jsou dvě výsypky, kterými se odvádí struska přes drtiče typu „MARTIN“.

Spalovací komora je zakrytá betonovým stropem a samotná vyzdívka je tvořena šamotovými tvarovkami. Z vnější strany je kotel obložen izolačními matracemi a opatřen oplechováním. Stěny spalovací komory jsou chlazeny trubkami, které vedou kolem všech čtyř stěn kotle. Ve spodní části kotle je umístěn granulační rošt, na kterém dochází k ochlazování strusky.

Napájení kotlů vodou je zajištěno čtyřmi elektronapáječkami o jmenovitém výkonu 100 t/h. Všechny napáječky berou vodu ze sacího řádu, který je pro všechny společný. Také se u kotle provádí odluh a odkal, který slouží k udržování kvality vody v kotli. Na každé směně se provádí odběr kotelní vody a její následný rozbor. Podle rozboru vzorku bývá nařízen stupeň odkalu. Odluh je prováděn trvale z prostoru hladiny kotelní vody a odtud je odváděn k regulačnímu ventilu odluhu. Chlazení páry se provádí vstřikem napájecí vody do páry ve směru proudění páry mezi konvenčním a sálavým přehřívákem.

3.1.1 Technické parametry kotle

Jmenovitý výkon:	49,7	MW (67 t/h)
Minimální výkon:	18,5	MW (25 t/h)
Jmenovitý přetlak páry:	7,65	MPa
Konstrukční přetlak páry:	8,3	MPa
Jmenovitá teplota přehřáté páry:	485 ± 8	°C
Maximální teplota přehřáté páry:	500	°C
Teplota napájecí vody:	160	°C

3.1.2 Technické parametry hořáku

Počet hořáků:	3		
Značka:	STORK		
Typ:	HTNR		
Regulační rozsah na jeden hořák (uhlí):	1,75:1		
Regulační rozsah na jeden hořák (ZP):	4:1		
Regulační rozsah na jeden hořák (KP):	3,5:1		
Výkon hořáku (spalování uhlí):	21,7	MW	
Výkon hořáku (spalování plynu):	5,4	MW	
Průměr hrdla hořáku:	850	mm	
Průměr trubice na uhlí:	420	mm	
Průměr regulátoru:	1125	mm	
Množství prášku na hořák:	0,904	kg·s ⁻¹	
Množství ZP na hořák:	0,152	Nm ³ ·s ⁻¹	547 Nm ³ ·h ⁻¹
Množství KP na hořák:	0,329	Nm ³ ·s ⁻¹	1184,4 Nm ³ ·h ⁻¹
Sekundární regulátor vzduchu:	obsluhován ručně		
Terciální regulátor vzduchu:	obsluhován ručně		
Zapalovací hořáky:	plynové/elektrické		
Množství plynu na 1 zapalovací hořák:	0,0056	Nm ³ ·s ⁻¹	
Záměna topných plynů je možná bez vypnutí hořáku.			

3.1.3 Parametry komínu

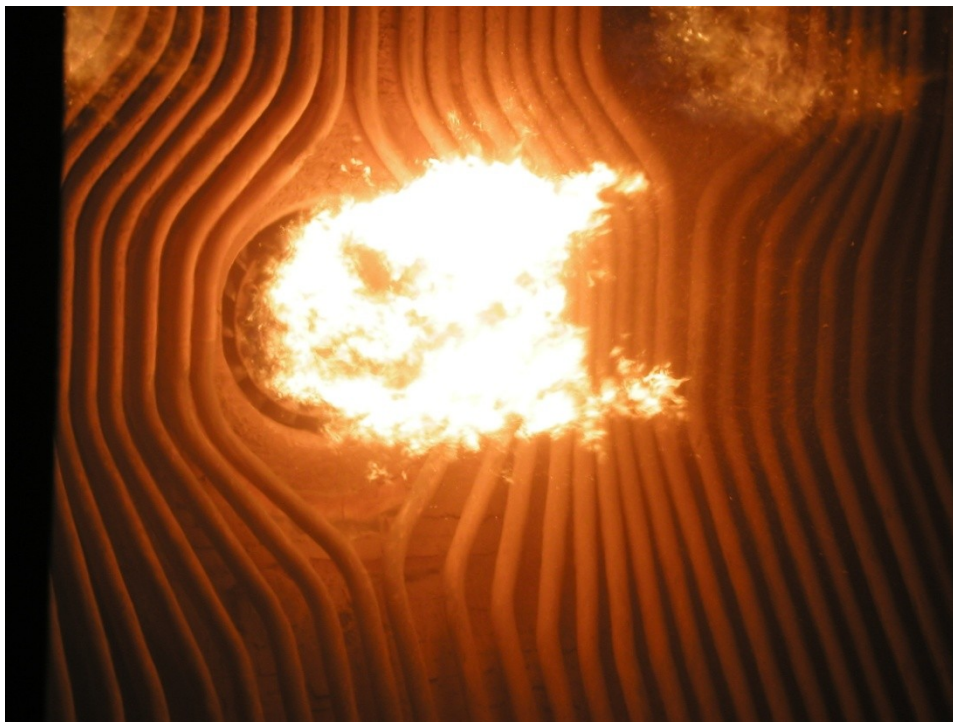
Výška:	50 m
Průměr patní kružnice:	1,8 m
Průměr komínu na ústí:	1,5 m

3.2 Paliva a jejich parametry

3.2.1 Černé uhlí a proplástek

Černé uhlí a proplástek (prorostlé uhlí nižší kvality) jsou hlavním palivem a jsou skladovány ve dvou zásobnících. Každý zásobník má obsah 240 tun uhlí. Ze zásobníku je uhlí podáváno redlerovým podavačem do spádovky, kde padá vlastní váhou, a je dopravováno do tří-kroužkových levotočivých mlýnů typu „FULLER E 38“. Zde se uhlí rozeemele na černouhelný prach a s nosným médiem (vzduchem) je foukáno přímo do

hořáků kotle (viz.obr.č.3.3). Požadovaný výkon mlýnu je 4,5 t/h a teplota sušícího vzduchu se pohybuje kolem 150 – 180 °C.



Obr.č.3.3 Start hořáku na plyn se zbytky částic uhlí [4]

Parametry černého uhlí:

- Výhřevnost paliva: $Q_r^i = 22,5 \div 27,5$ MJ·kg⁻¹
- Obsah vody v surovém palivu: $W^r = 9 \div 12$ %
- Obsah popeloviny v surovém palivu: $A^r = 12 \div 18$ %
- Obsah síry v surovém palivu: $S_m^r = \max. 0,25$ g·MJ⁻¹

Parametry proplásku:

- Výhřevnost paliva: $Q_r^i = 16,5 \div 22,5$ MJ·kg⁻¹
- Obsah vody v surovém palivu: $W^r = 7 \div 13$ %
- Obsah popeloviny v surovém palivu: $A^r = 19 \div 49$ %
- Obsah síry v surovém palivu: $S_m^r = \max. 0,31$ g·MJ⁻¹

3.2.2 Zemní plyn a Koksárenský plyn

Zemní plyn i koksárenský plyn slouží jako zapalovací a stabilizační palivo (viz.obr.č.3.4). Hlavním stabilizačním palivem je koksárenský plyn. Regulace plynových hořáků je prováděno škrcení tlaku v přívodním potrubí. Toto škrcení musí probíhat samostatně jak pro zemní plyn, tak pro koksárenský plyn, ale zároveň na všech hořácích současně. Současně se nemůže spalovat koksárenský plyn se zemním, ale přechod z jednoho plynu na druhý je možný bez odstavení hořáku.



Obr.č.3.4 Hořák v provozu na koksárenský plyn [4]

Parametry zemního plynu:

- Výhřevnost paliva: $Q_i^r = 34$ MJ·Nm⁻³
- Spalné teplo: $Q_n^r = 38$ MJ·Nm⁻³
- Přetlak na rozdělovači: $p = 5$ kPa
- Teplota plynu: $t = 10$ °C
- Hustota: $\rho = 0,696$ kg·m⁻³
- Složení:
 - Metan CH_4 88,3 %
 - Etan C_2H_6 3,1 %
 - Propan C_3H_8 3,0 %
 - Butan C_4H_{10} 0,2 %

- Kyslík O_2 0,5 %
- Dusík N_2 4,9 %

- Mez výbušnosti ve směsi se vzduchem: dolní – 5 % horní – 15 %

Parametry koksárenského plynu:

- Výhřevnost paliva: $Q_r^i = 15,65 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$
- Spalné teplo: $Q_h^r = 17,85 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$
- Přetlak p na rozdělovači: $2 \div 3$ kPa
- Teplota plynu: $t = 40$ °C
- Hustota: $\rho = 0,497$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Složení:
 - Vodík H_2 54 %
 - Metan CH_4 26,5 %
 - Oxid uhelnatý CO 6,2 %
 - Oxid uhličitý CO_2 2,2 %
 - Dusík N_2 10,6 %
 - Kyslík O_2 0,5 %

Mez výbušnosti ve směsi se vzduchem: dolní – 4,5 % horní – 33,8 %

3.3 Popis plynového hospodářství teplárny

Jako plynové spotřebiče jsou v kotelně nainstalovány 4 vysokotlaké kotle K1 až K4, jejichž výrobcem jsou Vítkovice a.s. Jde o strmotrubnaté práškové kotle s granulačním roštem. Každý kotel má výkon 67,8 t/h (49,7 MW) o tlaku 7,65 MPa a teplotě přehřáté páry 485°C. Hlavním palivem těchto kotlů je černouhelný prach. Pomocné médium je koksárenský nebo zemní plyn. Grafické zpracování plynového hospodářství celé teplárny viz příloha (1). Hořáky pro kotle K2 a K3 jsou konstruovány jako kombinované pro spoluspalování černouhelného prachu a koksárenského plynu. Výkon plynových hořáků je regulován změnou (škrcením) tlaku v přívodním potrubí a to samostatně pro zemní i koksárenský plyn, ale pro všechny hořáky současně. Regulační rozsah jednotlivých hořáků viz tabulka č.3.1.

Regulace	K1		K2		K3		K4	
	KP	ZP	KP	ZP	KP	ZP	KP	ZP
	1 : 2	1 : 2	1 : 3,5	1 : 4	1 : 3,5	1 : 4	1 : 3	1 : 3

3.3.1 Přívod koksárenského plynu

Přívod koksárenského plynu do kotelny je proveden dvěma plynovými řády SA a SB o světlosti DN500. Tyto řády jsou napojeny na Koksovnu Svoboda. Napojení je provedeno šoupátky č. 1 (SB) a č. 2 (SA), které slouží jako hlavní uzávěry plynu pro ZOS. Za těmito hlavními uzávěry plynu jsou šoupátka DN40 pro odvod kondenzátu z potrubí, dále pak ventily DN25 pro připojení páry (pro propařování plynovodu), měřicí clony pro Koksovnu Svoboda, za kterými je další odvod kondenzátů šoupátky DN40. Před a za měřicí clonou je přívod páry ventily DN25. Odvod kondenzátu je proveden spádem do společného kapáku, který je majetkem Koksozny Svoboda. Konce obou plynových řádů jsou opatřeny odvzdušněním DN40, a to č. 18 (SB) a č. 19 (SA). Na konci obou řádů je proveden odvod kondenzátů do kapáků. Z těchto plynových řádů jsou provedeny přípojky DN400 ke každému kotli přes dvojici šoupátek DN400. Za šoupátky DN 400 je jedna větev napojena do druhé. Grafické zpracování přívodu koksárenského plynu ke kotlům viz příloha (1).

3.3.2 Přívod zemního plynu

Přívod zemního plynu je napojen na rozvodnou komoru hlavního řádu DN 250 v kotelně. Hlavní uzavírací ventil pro kotelnu je umístěn na hlavním řádu rozvodu zemního plynu. Grafické zpracování přívodu zemního plynu ke kotlům viz příloha (1).

3.3.3 Regulace a měření

Za normálních okolností jsou v provozu oba plynové řády. Odstavují se střídavě, a to v případě potřeby čištění potrubí (propařování parou) nebo při odstraňování poruch.

Zařízení není vybaveno regulačními prvky, jelikož regulace tlaku plynu v řádech je prováděna rozvodným systémem dodavatele plynu. Z měřících přístrojů jsou v každém plynovém řádu před odbočkami ke kotlům instalovány měřicí clony pro měření množství s rozsahem 10 000 Nm³/hod pro každý řád. Dále je v každém řádu instalováno měření tlaku a teploty plynu. U každého kotle je měřen tlak plynu přímým tlakoměrem před bezpečnostním uzávěrem, před a za regulačním orgánem, a před každým hořákem

Kotelna je vybavena kontinuálním měřením výskytu plynu v ovzduší, dále pak hlavními uzávěry koksárenského plynu (klapky DN500) a zemního plynu (šoupátko DN300) s elektropohonem s místním ovládáním a dálkovým ovládáním z velína.

3.3.4 Přerušení dodávky koksárenského plynu

Vzhledem k tomu, že koksárenský plyn je odebírán pro kotelnu z nízkotlaké sítě koksovny Svoboda, na kterou je napojen plynojem, je dodávka plynu i dodržování parametrů bezpečné.

V zimním období by však mohlo dojít, zejména při velmi nízkých venkovních teplotách, k přerušení dodávky plynu v důsledku poklesu teplot plynu pod bod mrazu, kondenzaci a zamrznutí nasycených vodních par, krystalizaci a usazení naftalenu a ostatních složek, které plyn obsahuje, což se projeví poklesem tlaku plynu do takové míry, že bezpečnostní uzávěry uzavřou přívod plynu k hořákům kotle, čímž dojde k výpadku kotle při výkonu nižším než 60 %.

3.3.5 Čištění plynového potrubí

Jelikož je koksárenský plyn dodávaný z Koksovny Svoboda značně nečistý s velkým obsahem naftalenu, olejů, dehtu a vody, je nutno věnovat maximální pozornost odvádění vody a nečistot z potrubí. To se provádí pravidelnou kontrolou odvodňovačů plynu (kapáků), musí se dbát na jejich správnou činnost, především v zimním období, kdy je nutno jak přívodní potrubí, tak i odvodňovače vytápět párou. K pravidelným údržbářským pracím patří i časté odvodňování plynového potrubí a přípojek před bezpečnostními uzávěry. Čištění potrubí se provádí za účelem odstraňování pevných nečistot, které se za provozu usazují na vnitřních stěnách potrubí.

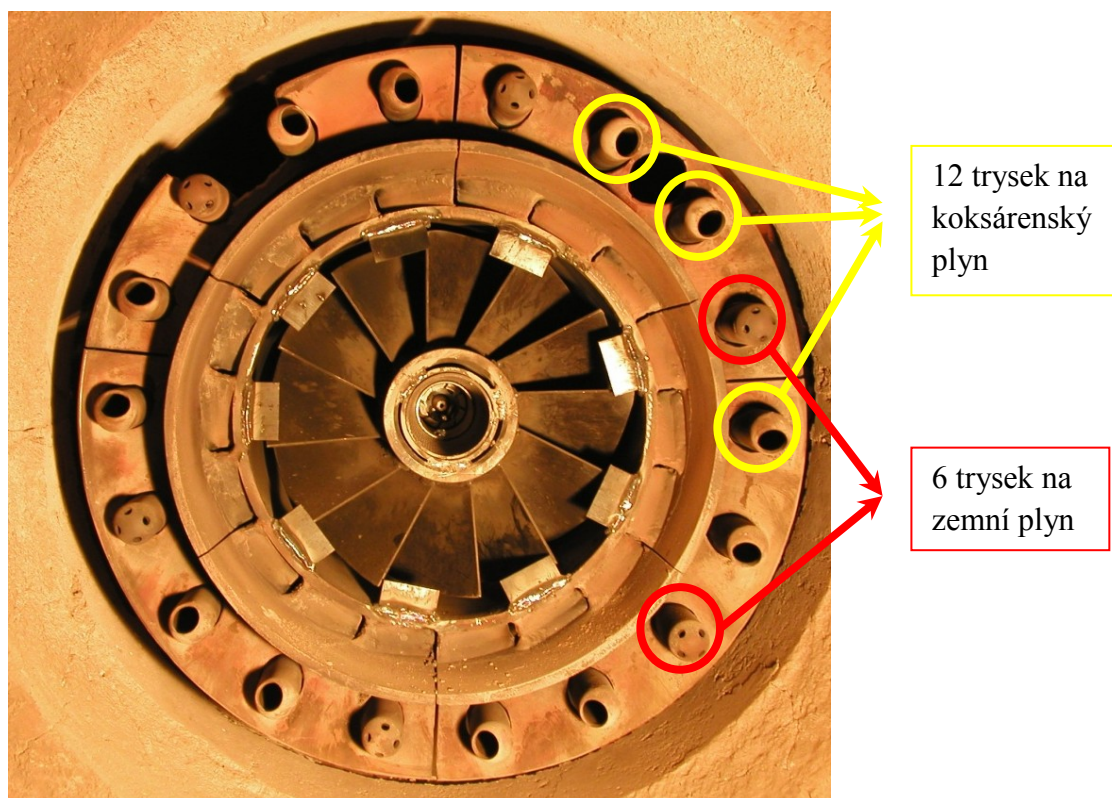
Úsek potrubí, který se čistí, se nejdříve řádně ze všech stran uzavře, otevřou se odvodušňovací kohouty, odpojí se potrubí od odváděčů kondenzátu a napojí se přívod syté páry, kterou se nejdříve z potrubí vypudí plyn a v následující fázi se teplem rozpouští pevné usazeniny a odplavují se zkondenzovaná voda ven mimo potrubí. Potrubí se vypařuje tak dlouho, až ze všech výustí vyfukuje čistá pára.

4. Popis možných variant řešení

V této kapitole se zabývám návrhem různých variant řešení pro úpravu kotle K2. Cílem navržených variant je, aby tento kotel mohl být provozován pouze na koksárenský plyn do definovaného výkonu 40 MW a také aby mohl být provozován v režimu spalování koksárenského plynu a uhlí. Díky úpravě kotle K2 by měla být zajištěna 100 % záloha pro kotel K1 nebo K4 z hlediska celkového příkonu hořáku při spalování koksárenského plynu.

4.1 Varianta č. 1

První varianta se zabývá možností úpravy stávajících hořáků za účelem zvýšení jejich výkonu. Výstupní trysky pro spalování koksárenského a zemního plynu jsou rozmístěny po obvodu hořáků. Pro spalování koksárenského plynu je použito 12 trysek a pro spalování zemního plynu je použito 6 trysek (viz.obr.č.4.1). Akčním členem regulace koksárenského plynu je regulační klapka v přívodním potrubí koksárenského plynu. Regulační klapku je možno ovládat ručně nebo je klapka řízena automaticky při výkonové regulaci.



Obr.č.4.1 Trysky koksárenského a zemního plynu na hořáku [4]

Před úpravou trysek na zemní plyn připadá na jeden hořák maximální spalované množství koksárenského plynu $0,329 \text{ m}_n^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Při minimální výhřevnosti koksárenského plynu $14,7 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$ vychází tepelný výkon jednoho hořáku $4,84 \text{ MW}_t$. Celkový tepelný výkon kotle potom vychází cca $14,52 \text{ MW}_t$.

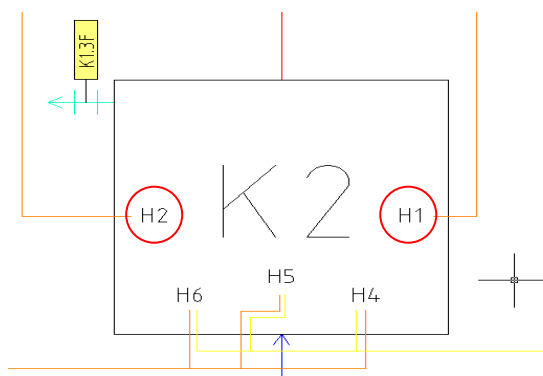
Následná úprava spočívá v tom, že trysky pro spalování zemního plynu se upraví k využití spalování koksárenského plynu. Díky této úpravě by se měl výkon hořáku při spalování koksárenského plynu zvýšit o 50 %. Potom by tepelný výkon jednoho hořáku byl $7,26 \text{ MW}_t$ a celkový tepelný výkon kotle by se zvýšil na cca $21,8 \text{ MW}_t$.

Požadovaný výkon kotle je 40 MW_t . Při účinnosti kotle 90 % je nutné přivést do kotle celkový tepelný příkon v koksárenském plynu $44,4 \text{ MW}_t$. Jelikož po úpravě hořáků vychází tepelný výkon kotle cca $21,8 \text{ MW}_t$ bude nutné dodatečně zvýšit příkon o $22,6 \text{ MW}_t$. Aby bylo možno dosáhnout tepelného příkonu $44,4 \text{ MW}_t$ jsem navrhl instalaci 2 nových hořáků v bočních stěnách kotle. Každý hořák by měl mít výkon $11,3 \text{ MW}_t$ a maximální spotřebu $2770 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

S ohledem na skutečnost, že při úpravě stávajících hořáků bude zrušena možnost jejich provozu na zemní plyn, doporučuji tuto možnost zachovat u nově instalovaných hořáků. Navrhuji tedy, aby dva nové hořáky byly provedeny jako dvoupalivové pro spalování koksárenského i zemního plynu.

4.2 Varianta č. 2

2. varianta spočívá v zachování 3 stávajících čelních kombinovaných hořáku bez jakýchkoliv úprav a instalaci 2 nových hořáků do bočních stěn spalovací komory pouze na koksárenský plyn (viz.obr.č.4.2).



Obr.č.4.2 Umístění hořáků na kotli K2

Při minimální výhřevnosti koksárenského plynu $14,7 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$ a maximálním spalovaném množství koksárenského plynu $0,329 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ vychází tepelný výkon jednoho hořáku $4,84 \text{ MW}_t$. Celkový tepelný výkon kotle potom vychází cca $14,52 \text{ MW}_t$. Požadovaný výkon kotle je 40 MW_t . Při účinnosti kotle 90% je nutné přivést do kotle celkový tepelný příkon v koksárenském plynu $44,4 \text{ MW}_t$. Pro zajištění tohoto příkonu navrhuji instalaci 2 nových hořáků o příkonu $2 \times 15 \text{ MW}_t$ a maximální spotřebě $2 \times 3674 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Z technického i ekonomického hlediska doporučuji použití úprav popsanych ve variantě č.2. Dále doporučuji prověřit možnost využití dvou odstavených hořáků z Výtopy Mariánské Hory (dále jen VMH).

5. Popis vybrané varianty č. 2

Variantu č. 2 rozdělím na varianty 2A a 2B

5.1 Varianta č.2A

Z hlediska dispozičních možností kotle K2 přichází v úvahu použití 2 výkonových hořáků z VMH pro spalování koksárenského plynu. Rozmístění stávajících a nově instalovaných hořáků bude stejné, jak bylo navrženo ve variantě č. 2. To znamená 3 kombinované hořáky v přední stěně a 2 výkonové hořáky z VMH v bočních stěnách.

Tepelný příkon obou nově instalovaných hořáků při maximálním průtoku koksárenského plynu 1 hořákem $2290 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a výhřevnosti koksárenského plynu $15,65 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ vychází $2 \times \text{cca } 10 \text{ MW}_t = 20 \text{ MW}_t$. Tepelný příkon 3 stávajících hořáku je $3 \times \text{cca } 5 \text{ MW}_t = 15 \text{ MW}_t$. Celkový tepelný příkon všech hořáků při spalování koksárenského plynu bude cca 35 MW_t . Z přibližných výpočtů lze vidět, že nebude možno dosáhnout požadovaného výkonu kotle. Na základě výsledku tepelného příkonu nedoporučuji využití výkonových hořáků z VMH.

5.2 Varianta č.2B

Varianta č. 2 představuje kompletní zachování stávajících kombinovaných práškových a plynových hořáků č. 4, č. 5, č. 6, včetně zachování možnosti spalovat

zemní plyn. Aby se dosáhlo spalování požadovaného množství koksárenského plynu, je třeba instalovat dva nové plynové hořáky (PL1 a PL2) na bočních stěnách kotle. Nové plynové hořáky budou o výkonu cca 15 MWt.

Pro tuto variantu zůstane zachován stávající přívod a hlavní uzávěr koksárenského plynu na kotelně 2 x DN 400 včetně armatur. Nově bude instalováno navazující potrubí DN 500 od místa spojení s potrubím DN 400 až po napojení na stávající rozvod DN 300 u stávající výkonové stanice koksárenského plynu před plynovými hořáky. Pro dva nově instalované plynové hořáky se instaluje nové přívodní potrubí koksárenského plynu DN 350 z nového rozvodu DN 500. Potrubí se napojí na stávající odvodnění a odvodušnění, včetně uzemnění.

Rozvod zemního plynu zůstane kompletně zachován včetně hlavního uzávěru na kotelně a stávající výkonové stanice.

Přívod spalovacího vzduchu na pravé straně kotle K2 pro stávající hořáky č. 4 a č. 5 zůstane zachován, pouze se pod přívodní kanál instaluje nový kanál horkého vzduchu o rozměrech 650 x 800 mm. Tento kanál se napojí na nový plynový hořák PL1. Přívod spalovacího vzduchu na levé straně pro stávající hořák č. 6 zůstane také zachován a kanál pro přívod vzduchu do mlýna se sníží o cca 650 mm. Mezi tyto kanály horkého vzduchu se instaluje nový přívodní vzduchový kanál o rozměrech cca 650 x 800 mm, kterým se horký vzduch přivede do nového plynového hořáku PL2.

Pro snížení emisních limitů při spalování pouze na koksárenský plyn doporučuji instalaci recirkulačních kanálů, kterými budou spaliny přivedeny z výstupu za kotlem přes recirkulační ventilátor zpět do vzduchových kanálů na pravé a levé straně kotle.

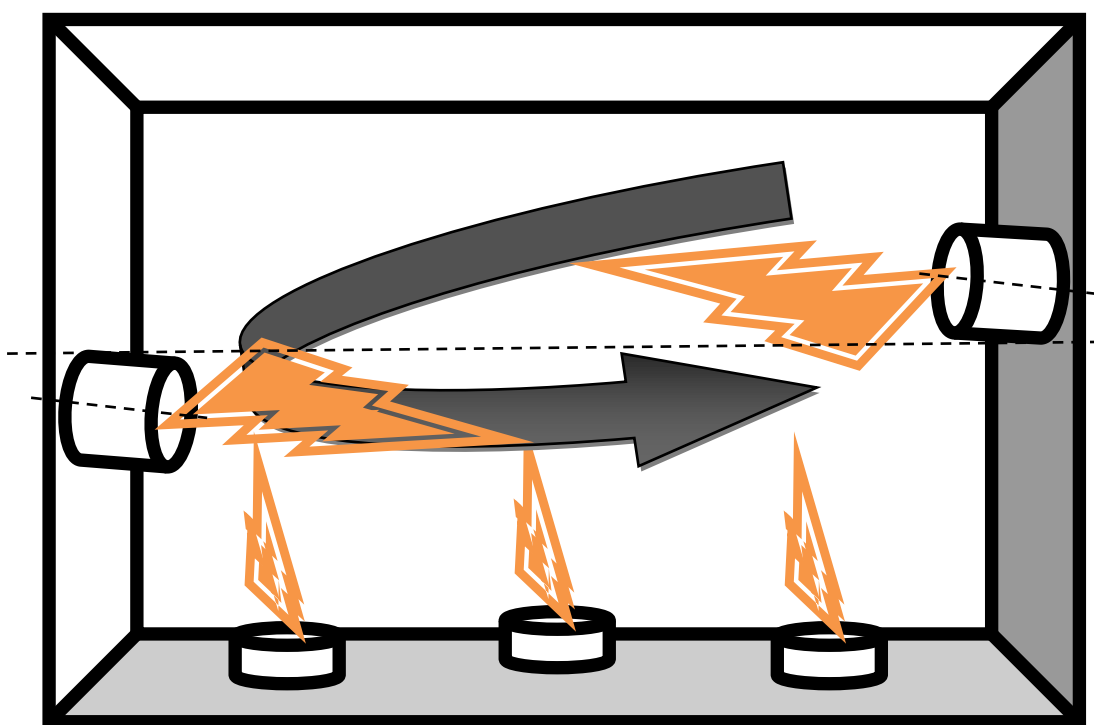
5.2.1 Umístění hořáků na kotli

Pro umístění nově instalovaných plynových hořáků do prostoru spalovací komory je třeba respektovat aktuální rozmístění stávajících čelních hořáků. Je třeba splnit požadavky přiměřené rovnoměrnosti teplotního pole při různé konfiguraci provozovaných hořáků.

Důvodem, proč nebude možno dosáhnout ideálních poměrů při dosažení rovnoměrného teplotního pole, je výkonové rozložení hořáků. Zatímco v přední stěně

jsou umístěny 3 hořáky o výkonu 3 x 5 MWt, tak v každé boční stěně je instalován 1 nový hořák o výkonu 15 MWt. Hořáky v bočních stěnách nebudou situovány přímo proti sobě, ale na levé straně budou umístěny blíže přední stěně, kdežto na pravé straně blíže zadní stěně. Dalším faktorem bude, že ve vodorovné rovině budou osy hořáků odkloněny pod úhlem 5° vůči kolmici k boční stěně kotle. Za předpokladu, že spalování koksárenského plynu v nových hořácích bude provozně preferováno, tak při jejich samotném provozu se plameny obou hořáků nebudou vzájemně ovlivňovat a bude docházet i k určité rotaci plamene ve spalovací komoře, a tím i k jejímu lepšímu vyplnění (viz.obr.č.5.1). Vířiče nových hořáků budou navrženy tak, aby protější stěny spalovací komory nebyly ovlivněny plamenem.

K jisté nerovnoměrnosti teplotního pole ve spalovací komoře bude docházet i při provozu všech hořáků na koksárenský plyn při celkovém tepelném příkonu hořáků vyšším než 30 MWt z důvodu již výše uvedených. Při těchto provozních stavech může dojít i k určitému vzájemnému ovlivnění plamenů stávajících čelních a nových bočních hořáků. Zejména na levé straně spalovací komory. Ale předpokládám, že nedojde k žádným negativním dopadům na provoz kotle vzhledem ke vzájemnému výškovému přesazení hořáků a dominantnímu výkonu nových hořáků (viz.obr.č.5.1).



Obr.č.5.1 Rozmístění hořáků na kotli K2 a rozložení plamene

5.2.2 Regulace výkonu nových plynových hořáků

Řídicí systém kotle bude nutno doplnit o regulační okruhy nově instalovaných hořáků na koksárenský plyn. Akčním členem regulace bude nově instalovaná regulační klapka v přívodu koksárenského plynu k novým hořákům. Regulační klapku bude možno ovládat ručně nebo bude klapka řízena automaticky při výkonové regulaci kotle na požadovaný tlak nebo množství přehřáté páry ve výstupním parovodu.

Výkonovou regulaci kotle na koksárenský plyn předpokládám pouze v případě provozu bez uhlí, přičemž koksárenský plyn může být společně spalován i ve stávajících čelních hořácích. Výkon těchto hořáků je cca 3x5 MWt, takže navrhuji, aby řízení jejich výkonu bylo nastavitelné ve 2 výkonových úrovních 50 a 100 %.

5.2.3 Regulace vzduchu do plynových hořáků

Jedná se o samostatný regulační okruh pro každý z obou nových plynových hořáků. Akčními orgány jsou regulační klapky v přívodu vzduchu do obou nových hořáků. Regulaci vzduchu do stávajících čelních hořáků je možno zachovat. Za účelem dosažení požadovaného množství emisí NO_x při spalování koksárenského plynu navrhuji, aby do přívodního potrubí vzduchu obou nových plynových hořáků byly přivedeny studené spaliny z výtlačku recirkulačního ventilátoru.

6. Technické a ekonomické zhodnocení navržené varianty

Náklady související s variantou č. 1 jsou odhadnuty ve výši 10 500 000 Kč. Odhad nákladů pro variantu č. 2 je o cca milión méně někde kolem 9 500 000 Kč.

Náklady jsou odhadovány z úprav:

- Palivového hospodářství
- Vzduchospalinového traktu
- Vyzdívky, nátěry, ocelové konstrukce, demontáže
- Měření, regulace + kompletní montážní práce

Varianta č. 1 nám v podstatě dává odpověď na otázku, jakého zvýšení výkonu lze dosáhnout úpravou stávajících čelních hořáků. Z ekonomického a technického hlediska nám tato varianta nenabízí žádné výhody oproti variantě č. 2. Časová náročnost realizace projektu je u obou variant zhruba stejná.

Technický přínos pro TPV je v tom, že po úpravě kotle K2 bude zajištěna 100 % záloha pro kotel K1 nebo K4. Díky této 100 % zálohy bude možno provádět plánované i nahodilé odstávky jednoho nebo druhého kotle. Z této 100 % zálohy vyplývá i ekonomický přínos, protože nemůže dojít k zastavení odběru přebytků koksárenského plynu z koksovny Svoboda při poruše na kotli K1 nebo K4 a tím pádem nedojde k přerušení výroby elektrické energie.

7. Výpočet účinnosti kotle

Účinnost kotle budu počítat jak pro spalování pouze koksárenského plynu, tak pro spalování pouze černého uhlí. Pro výpočet účinnosti použiju nepřímou metodu. To znamená, že velikosti poměrných tepelných ztrát kotle odečtu od 100 %. Budu uvažovat 5 základních ztrát:

- Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích Z_c
- Ztráta hořlavinou ve spalínách Z_{co}
- Ztráta sdílením tepla do okolí Z_{sv}
- Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků Z_f
- Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta) Z_k

7.1 Výpočet účinnosti kotle pro spalování černého uhlí

Spalování probíhá s přebytkem vzduchu $n=1,419$. Výhřevnost černého uhlí je $24\,300\text{ [kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$. Pro veškeré výpočty využiji program EXCEL, který je součástí přílohy této bakalářské práce.

Hodnoty potřebné pro výpočet	
Jmenovitý výkon kotle	49,7 [MW]
Obsah O_2 ve spalínách	6,5 [%]
Teplota tuhých zbytků	600 [°C]
Teplota spalin	145 [°C]
Naměřený objemový podíl CO ve spalínách	18 [ppm]
Hmotnostní podíl uhlíku ve škváře	5,95 [%]
Hmotnostní podíl uhlíku v popílku	5,02 [%]
Hmotnostní podíl složky tuhých zbytků ve škváře	15 [%]
Hmotnostní podíl složky tuhých zbytků v popílku	85 [%]

7.1.1 Stechiometrie

Objemové složení černého uhlí

Složka	[%]
A^r	17,53
W^r	8,20
C^r	64,36
H^r	3,79
S^r	0,42
N^r	1,06
O^r	4,64

Výpočet množství spalovacího vzduchu

$$V_{O_2} = \frac{22,4}{12} \cdot C^r + \frac{22,4}{32} \cdot S^r + \frac{22,4}{4} \cdot H_2^r - \frac{22,4}{32} \cdot O_2^r \quad (1)$$

$$V_{O_2} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,6436 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,0042 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,0379 - \frac{22,4}{32} \cdot 0,0464$$

$$V_{O_2} = \mathbf{1,384} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{VZ;t}^S = \frac{V_{O_2}}{0,21} = \frac{1,384}{0,21} = \mathbf{6,591} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (2)$$

$$V_{VZ;SK}^S = V_{VZ;t}^S \cdot n = 6,591 \cdot 1,419 = \mathbf{9,352} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3)$$

Výpočet množství vzniklých spalín

$$V_{SP;t}^S = \frac{22,4}{12} \cdot C^r + \frac{22,4}{32} \cdot S^r + \frac{22,4}{28} \cdot N_2^r + 0,79 \cdot V_{VZ;t}^S \quad (4)$$

$$V_{SP;t}^S = \frac{22,4}{12} \cdot 0,6436 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,0042 + \frac{22,4}{28} \cdot 0,0106 + 0,79 \cdot 6,591$$

$$V_{SP;t}^S = \mathbf{6,420} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{SP;SK}^S = V_{SP;t}^S + (n - 1) \cdot V_{VZ;t}^S = 6,420 + (1,419 - 1) \cdot 6,591 \quad (5)$$

$$V_{SP;SK}^S = \mathbf{9,181} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot H_2^r + \frac{22,4}{18} \cdot W^r + (v - 1) \cdot V_{VZ;SK}^V \quad (6)$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot 0,0379 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,0820 = \mathbf{0,527} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{SP;SK}^V = V_{SP;SK}^S + V_{H_2O} = 9,181 + 0,527 = \mathbf{9,708} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (7)$$

Složení spalín

1) Vlhké spaliny

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot C^r}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot 0,6436}{9,708} \cdot 100 = \mathbf{12,376} [\%]$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{0,527}{9,708} \cdot 100 = \mathbf{5,424} [\%]$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{\frac{22,4}{32} \cdot S^r}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{\frac{22,4}{32} \cdot 0,0042}{9,708} \cdot 100 = \mathbf{0,030} [\%]$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZ;t}^S}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100$$

$$O_2 = \frac{0,21 \cdot (1,419 - 1) \cdot 6,591}{9,708} \cdot 100 = \mathbf{5,974} [\%]$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{\frac{22,4}{28} \cdot N_2^r + 0,79 \cdot V_{VZ;SK}^S}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100$$

$$N_2 = \frac{\frac{22,4}{28} \cdot 0,0106 + 0,79 \cdot 9,352}{9,708} \cdot 100 = \mathbf{76,196} [\%]$$

2) Suché spaliny

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100 = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot C^r}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100 = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot 0,6436}{9,181} \cdot 100 = \mathbf{13,085 [\%]}$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100 = \frac{\frac{22,4}{32} \cdot S^r}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100 = \frac{\frac{22,4}{32} \cdot 0,0042}{9,181} \cdot 100 = \mathbf{0,032 [\%]}$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100 = \frac{0,21 \cdot (n-1) \cdot V_{VZ;t}^S}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100$$

$$O_2 = \frac{0,21 \cdot (1,419 - 1) \cdot 6,591}{9,181} \cdot 100 = \mathbf{6,317 [\%]}$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100 = \frac{\frac{22,4}{28} \cdot N_2^r + 0,79 \cdot V_{VZ;SK}^S}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100$$

$$N_2 = \frac{\frac{22,4}{28} \cdot 0,0106 + 0,79 \cdot 9,352}{9,181} \cdot 100 = \mathbf{80,566 [\%]}$$

Stechiometrické objemy jednotlivých složek v suchých spalínách

$$V_{sCO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r = \mathbf{1,1939 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]} \quad (8)$$

$$V_{sSO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r = \mathbf{0,0029 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]} \quad (9)$$

$$V_{sN_2} = \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r = \mathbf{0,0085 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]} \quad (10)$$

$$V_{sCO} = \frac{22,41}{12,011} \cdot C^r = \mathbf{1,202 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]} \quad (11)$$

$$V_{O_2(C)} = \frac{22,39}{12,011} \cdot C^r = \mathbf{1,2009 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]} \quad (12)$$

Složení suchého spalovacího vzduchu

$$V_{vCO_2} = 0,0003 \cdot V_{VZ;t}^S = 0,0003 \cdot 6,591 = 0,00091 [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (13)$$

$$V_{vN_2} = 0,7809 \cdot V_{VZ;t}^S = 0,7809 \cdot 6,591 = 2,356 [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (14)$$

$$V_{vAr} = 0,0093 \cdot V_{VZ;t}^S = 0,0093 \cdot 6,591 = 0,028 [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (15)$$

7.1.2 Výpočet tepelných ztrát

Přivedené teplo v 1 kg paliva

$$Q_{in} = Q_i^r + \Delta Q_{POV} + \Delta Q_{pal} + \Delta Q_{sr} [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (16)$$

ΔQ_{POV} teplo přivedené předehřevem spalovacího vzduchu

ΔQ_{pal} teplo přivedené předehřevem paliva

ΔQ_{sr} teplo přivedené recirkulací spalin

$$Q_{in} = 24\,300 + 0 + 0 + 0 = \mathbf{24\,300} [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výpočet konstant

Pro další výpočty předpokládáme, že:

- podíl b v $kg \cdot kg^{-1}$ uhlíku neshoří vůbec a odchází ze spalovacího zařízení společně s tuhými zbytky (škvára, popílek, úlet),
- podíl a_1 v $kg \cdot kg^{-1}$ uhlíku shoří nedokonale na plynnou složku CO.

$$b = \frac{A^r}{C^r} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot X_i}{1 - C_i} [kg \cdot kg^{-1}] \quad (17)$$

$$b = \frac{0,1753}{0,6436} \cdot \left(\frac{0,0595 \cdot 0,15}{1 - 0,0595} + \frac{0,0502 \cdot 0,85}{1 - 0,0502} \right) = \mathbf{0,0148} [kg \cdot kg^{-1}]$$

$$a_1 = \frac{R7 \cdot \omega_{CO}}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3} [kg \cdot kg^{-1}] \quad (18)$$

$$a_1 = \frac{8,747 \cdot 0,000018}{-7,8687 \cdot 0,065 + 3,1172 \cdot 0,000018 + 1,6596} = \mathbf{0,000137} [kg \cdot kg^{-1}]$$

$$\omega_{O_2} = 0,065 [m^3 \cdot m^{-3}]$$

$$\omega_{CO} = 0,000018 [m^3 \cdot m^{-3}]$$

$$V_1 = V_{SP,t}^S - V_{VZ,t}^S = 6,420 - 6,591 = \mathbf{-0,1713} \quad (19)$$

$$V_2 = V_{SCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{SCO_2} = 1,202 + 0,5 \cdot 1,2009 - 1,1939 \quad (20)$$

$$V_2 = \mathbf{0,6085}$$

$$V_3 = V_{O_2}(C) - V_{SCO_2} = 1,2009 - 1,1939 = \mathbf{0,007} \quad (21)$$

$$R1 = V_{VZ,t}^S \cdot V_{SCO} = -6,591 \cdot 1,202 = \mathbf{-7,8687} \quad (22)$$

$$R2 = V_{VZ,t}^S \cdot (0,5 \cdot V_{O_2}(C) - 0,2095 \cdot V_2) \quad (23)$$

$$R2 = 6,591 \cdot (0,5 \cdot 1,2009 - 0,2095 \cdot 0,6085) = \mathbf{3,1172}$$

$$R3 = 0,2095 \cdot V_{VZ,t}^S \cdot V_{SCO} = 0,2095 \cdot 6,591 \cdot 1,202 = \mathbf{1,6596} \quad (24)$$

$$R4 = V_{SCO} \cdot (V_1 + b \cdot V_3) = 1,202 \cdot (-0,1713 + 0,0148 \cdot 0,007) = \mathbf{-0,2057} \quad (25)$$

$$R5 = V_2 \cdot (b \cdot V_{O_2}(C) - 0,2095 \cdot V_{VZ,t}^S) - 0,5 \cdot V_{O_2}(C) \cdot (V_1 + b \cdot V_3) \quad (26)$$

$$R5 = 0,6085 \cdot (0,0148 \cdot 1,2009 - 0,2095 \cdot 6,591) - \\ 0,5 \cdot 1,2009 \cdot (-0,1713 + 0,0148 \cdot 0,007) = \mathbf{-0,727}$$

$$R6 = V_{SCO} \cdot (0,2095 \cdot V_{VZ,t}^S - b \cdot V_{O_2}(C)) \quad (27)$$

$$R6 = 1,202 \cdot (0,2095 \cdot 6,591 - 0,0148 \cdot 1,2009) = \mathbf{1,638}$$

$$R7 = V_{VZ,t}^S \cdot (0,2095 \cdot (V_1 + b \cdot V_3) + 0,2095 \cdot V_{VZ,t}^S - b \cdot V_{O_2}(C)) \quad (28)$$

$$R7 = 6,591 \cdot (0,2095 \cdot (-0,1713 + 0,0148 \cdot 0,007) + \\ 0,2095 \cdot 6,591 - 0,0148 \cdot 1,2009) = \mathbf{8,747}$$

Střední měrná tepelná kapacita spalín

$$A_0 = \left((1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right) \cdot A1 + V_{sSO_2} \cdot A2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot A3 + V_{vAr} \cdot A4 + V_{sH_2O} \cdot A5 + A^r \cdot (1 - X_{sk}) \cdot A7 - V_{VZ,t}^S (A6 + (v - 1) \cdot A5) + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot A8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot A9 \quad (29)$$

$$A_0 = \mathbf{0,00025}$$

$$B_0 = \left((1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right) \cdot B1 + V_{sSO_2} \cdot B2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot B3 + V_{vAr} \cdot B4 + V_{sH_2O} \cdot B5 + A^r \cdot (1 - X_{sk}) \cdot B7 - V_{VZ,t}^S (B6 + (v - 1) \cdot B5) + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot B8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot B9 \quad (30)$$

$$B_0 = \mathbf{1,2812}$$

$$C_0 = \left((1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right) \cdot C1 + V_{sSO_2} \cdot C2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot C3 + V_{vAr} \cdot C4 + V_{sH_2O} \cdot C5 + A^r \cdot (1 - X_{sk}) \cdot C7 - V_{VZ,t}^S (C6 + (v - 1) \cdot C5) + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot C8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot C9 \quad (31)$$

$$C_0 = \mathbf{-42,7718}$$

$$A_a = V_{VZ,t}^S \cdot (A6 + (v - 1) \cdot A5) = \mathbf{0,0008} \quad (32)$$

$$B_a = V_{VZ,t}^S \cdot (B6 + (v - 1) \cdot B5) = \mathbf{8,662} \quad (33)$$

$$C_a = V_{VZ,t}^S \cdot (C6 + (v - 1) \cdot C5) = \mathbf{-10,179} \quad (34)$$

$$A = A_0 + \alpha_k \cdot A_a = 0,00025 + 1,415 \cdot 0,0008 = \mathbf{0,0014} \quad (35)$$

$$B = B_0 + \alpha_k \cdot B_a = 1,2812 + 1,415 \cdot 8,662 = \mathbf{13,5386} \quad (36)$$

$$C = C_0 + \alpha_k \cdot C_a = -42,7718 + 1,415 \cdot (-10,179) = \mathbf{-57,1762} \quad (37)$$

$$\bar{c}_s(t_k) = \frac{\left(A \cdot (t_k + 273) + B + \frac{C}{t_k + 273} \right)}{V_{SP,SK}^V} [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}] \quad (38)$$

$$\bar{c}_s(t_k) = \frac{\left(0,0014 \cdot (145 + 273) + 13,5386 + \frac{-57,1762}{145 + 273} \right)}{9,708} = \mathbf{1,4414} [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$\bar{c}_s(t_0) = \frac{\left(A \cdot (t_0 + 273) + B + \frac{C}{t_0 + 273} \right)}{V_{SP,SK}^V} [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}] \quad (39)$$

$$\bar{c}_s(t_0) = \frac{\left(0,0014 \cdot (20 + 273) + 13,5386 + \frac{-57,1762}{20 + 273} \right)}{9,708} = \mathbf{1,4172} [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$\bar{c}_s = \frac{\bar{c}_s(t_k) \cdot t_k - \bar{c}_s(t_0) \cdot t_0}{t_k - t_0} [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}] \quad (40)$$

$$\bar{c}_s = \frac{1,4414 \cdot 145 - 1,4172 \cdot 20}{145 - 20} = \mathbf{1,44527} [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

Ztráta hořlavinou ve spalínách

vzniká nedokonalým spalováním a vyznačuje se obsahem nespálených plynů CO, H₂, C_xH_y ve spalínách.

$$Z_{CO} = \frac{12\,640 \cdot a_1 \cdot V_{SCO}}{Q_{in}} = \frac{12\,640 \cdot 0,000137 \cdot 1,202}{24\,300} = 0,000086 \quad (45)$$
$$Z_{CO} = 0,000086 \cdot 100 = \mathbf{0,0086} \text{ [\%]}$$

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

Představuje uhlík v tuhých zbytcích

$$Z_C = \frac{b \cdot C^r \cdot 32\,600}{Q_{in}} = \frac{0,0148 \cdot 0,6436 \cdot 32\,600}{24\,300} = 0,012797 \quad (46)$$
$$Z_C = 0,012797 \cdot 100 = \mathbf{1,2797} \text{ [\%]}$$

Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta)

Představuje jednu z největších ztrát kotle. Je určena tepelnou energií odcházejících spalin.

$$Z_k = \frac{V_s \cdot \bar{c}_s \cdot (t_k - t_0)}{Q_{in}} = \frac{9,708 \cdot 1,44527 \cdot (145 - 20)}{24\,300} = 0,072172 \quad (47)$$
$$Z_k = 0,072172 \cdot 100 = \mathbf{7,2172} \text{ [\%]}$$

Ztráta teplem tuhých zbytků

Způsobena nevyužitým teplem odcházejících tuhých zbytků.

$$Z_f = \frac{A^r \cdot \left(\sum \frac{X_i \cdot \bar{c}_{si} \cdot (t_i - t_0)}{1 - C_i} \right)}{Q_{in}} \quad (48)$$
$$Z_f = \frac{0,1753 \cdot \left(\frac{0,85 \cdot 0,7848 \cdot (145 - 20)}{1 - 0,0502} + \frac{0,15 \cdot 1,0132 \cdot (600 - 20)}{1 - 0,0595} \right)}{24\,300} = 0,001309$$
$$Z_f = 0,001309 \cdot 100 = \mathbf{0,1309} \text{ [\%]}$$

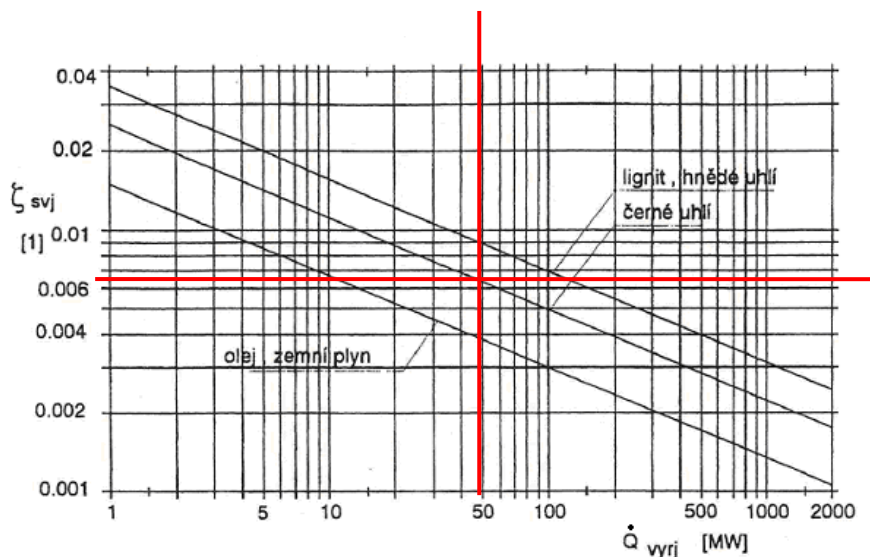
Střední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků (škvára, popílek)

$$\bar{c}_{ssk} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{sk} = 1,0132 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (49)$$

$$\bar{c}_{spop} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{pop} = 0,7848 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (50)$$

Ztráta sdílením tepla do okolí

Závislost ztráty sdílením tepla do okolí na výkonu kotle a druhu paliva je znázorněna na obr.6.1.



Obr.6.1 Závislost ztráty sdílením tepla do okolí na výkonu kotle [5]

$$Z_{sv} = Z_{svj} = 0,00686$$

$$Z_{sv} = 0,00686 \cdot 100 = \mathbf{0,686 \text{ [\%]}}$$

Konečný výpočet účinnosti

$$\eta = 1 - Z_{CO} - Z_C - Z_k - Z_f - Z_{sv} \quad (51)$$

$$\eta = 1 - 0,000086 - 0,012797 - 0,072172 - 0,001309 - 0,00686 = 0,90678$$

$$\eta = \mathbf{90,678 \text{ [\%]}}$$

7.2 Výpočet účinnosti kotle pro spalování koksárenského plynu

Spalování probíhá s přebytkem vzduchu $n=1,678$ a hustota plynu je 0,497. Výhřevnost koksárenského plynu je $17\,400 \text{ [kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}]$. Pro veškeré výpočty využiji program EXCEL, který je součástí přílohy této bakalářské práce.

Hodnoty potřebné pro výpočet	
Jmenovitý výkon kotle	40 [MW]
Obsah O_2 ve spalínách	8,6 [%]
Teplota tuhých zbytků	300 [°C]
Teplota spalín	113,6 [°C]
Naměřený objemový podíl CO ve spalínách	0 [ppm]

Hmotnostní podíl uhlíku ve škváře	0 [%]
Hmotnostní podíl uhlíku v popílku	0 [%]
Hmotnostní podíl složky tuhých zbytků ve škváře	0 [%]
Hmotnostní podíl složky tuhých zbytků v popílku	0 [%]

7.2.1 Stechiometrie

Objemové složení koksárenského plynu podle analýzy z koksovy svoboda

Složka	[%]
H ₂	52,8
CH ₄	24,2
C _n H _m	2,4
CO	6,9
CO ₂	3,1
N ₂	9,9
O ₂	0,7

Výpočet množství spalovacího vzduchu

$$V_{O_2} = \left[\left(x + \frac{y}{4} \right) \cdot C_x H_y \right] + 3,8 \cdot C_m H_n + 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S - O_2 \quad (52)$$

$$V_{O_2} = 2 \cdot CH_4 + 3,8 \cdot C_m H_n + 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 - O_2$$

$$V_{O_2} = 2 \cdot 0,242 + 3,8 \cdot 0,024 + 0,5 \cdot 0,069 + 0,5 \cdot 0,528 - 0,007$$

$$V_{O_2} = \mathbf{0,867} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

$$V_{VZ;t}^S = \frac{V_{O_2}}{0,21} = \frac{0,867}{0,21} = \mathbf{4,127} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (53)$$

$$V_{VZ;SK}^S = V_{VZ;t}^S \cdot n = 4,127 \cdot 1,678 = \mathbf{6,925} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (54)$$

Výpočet množství vzniklých spalín

$$V_{CO_2} = CO + CO_2 + \sum x \cdot C_x H_y + 2,6 \cdot C_m H_n \quad (55)$$

$$V_{CO_2} = CO + CO_2 + CH_4 + 2,6 \cdot C_m H_n$$

$$V_{CO_2} = 0,069 + 0,031 + 0,242 + 2,6 \cdot 0,024 = \mathbf{0,404} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

$$V_{H_2O} = H_2 + \sum \frac{y}{2} \cdot C_x H_y + 2,4 \cdot C_m H_n + H_2S + (v - 1) \cdot V_{VZ;SK}^S \quad (56)$$

$$V_{H_2O} = H_2 + 2 \cdot CH_4 + 2,4 \cdot C_m H_n$$

$$V_{H_2O} = 0,528 + 2 \cdot 0,242 + 2,4 \cdot 0,024 = \mathbf{1,070} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZ;t}^S = 0,21 \cdot (1,678 - 1) \cdot 4,127 = \mathbf{0,588} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (57)$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_{VZ;t}^S + N_2 = 0,79 \cdot 4,127 + 0,099 = \mathbf{3,359} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (58)$$

$$V_{SP;t}^S = V_{CO_2} + V_{N_2} = 0,404 + 3,359 = \mathbf{3,764} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (59)$$

$$V_{SP;SK}^S = V_{SP;t}^S + (n - 1) \cdot V_{VZ;t}^S = 3,764 + (1,678 - 1) \cdot 4,127 \quad (60)$$

$$V_{SP;SK}^S = 6,562 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

$$V_{SP;SK}^V = V_{SP;SK}^S + V_{H_2O} = 6,562 + 1,070 = 7,632 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (61)$$

Složení spalin

1) Vlhké spaliny

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{0,404}{7,632} \cdot 100 = 5,299 [\%]$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{1,070}{7,632} \cdot 100 = 14,015 [\%]$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{0,588}{7,632} \cdot 100 = 7,7 [\%]$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2} + 0,79 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZ;t}^S}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100$$

$$N_2 = \frac{3,359 + 0,79 \cdot (1,678 - 1) \cdot 4,127}{7,632} \cdot 100 = 72,986 [\%]$$

2) Suché spaliny

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100 = \frac{0,814}{6,562} \cdot 100 = 6,163 [\%]$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100 = \frac{0,588}{6,562} \cdot 100 = 8,955 [\%]$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2} + 0,79 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZ;t}^S}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100$$

$$N_2 = \frac{3,359 + 0,79 \cdot (1,678 - 1) \cdot 4,127}{6,562} \cdot 100 = 84,882 [\%]$$

7.2.2 Výpočet tepelných ztrát

Při výpočtu účinnosti v provozu pouze na koksárenský plyn budu počítat pouze se ztrátou fyzickým teplem spalin a se ztrátou sdílením tepla do okolí.

Přivedené teplo v 1 Nm³ paliva

$$Q_{in} = Q_i^r + \Delta Q_{POV} + \Delta Q_{pal} + \Delta Q_{sr} [kJ \cdot Nm^{-3}] \quad (62)$$

ΔQ_{POV} teplo přivedené předehřevem spalovacího vzduchu

ΔQ_{pal} teplo přivedené předehřevem paliva

ΔQ_{sr} teplo přivedené recirkulací spalin

$$Q_{in} = 17\,400 + 0 + 0 + 0 = 17\,400 [kJ \cdot Nm^{-3}]$$

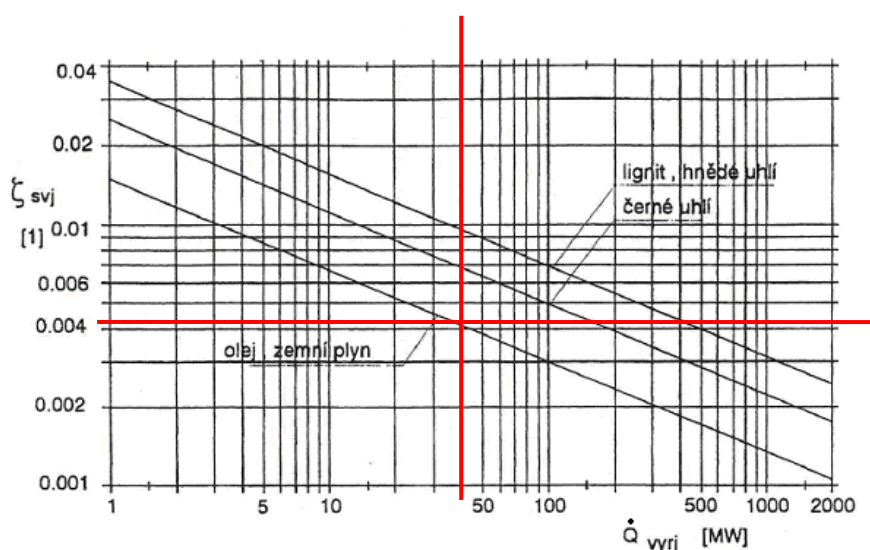
Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta)

Představuje jednu z největších ztrát kotle. Je určena tepelnou energií odcházejících spalin.

$$Z_k = \frac{V_s \cdot \bar{c}_s \cdot (t_k - t_0)}{Q_{in}} = \frac{7,632 \cdot 1,44 \cdot (113,6 - 20)}{17\,400} = 0,059116 \quad (63)$$
$$Z_k = 0,059116 \cdot 100 = \mathbf{5,9116 \text{ [\%]}}$$

Ztráta sdílením tepla do okolí

Závislost ztráty sdílením tepla do okolí na výkonu kotle a druhu paliva je znázorněna na obr.6.2



Obr.6.2 Závislost ztráty sdílením tepla do okolí na výkonu kotle [5]

$$Z_{sv} = Z_{svj} = 0,00423$$

$$Z_{sv} = 0,00423 \cdot 100 = \mathbf{0,423 \text{ [\%]}}$$

Konečný výpočet účinnosti

$$\eta = 1 - Z_k - Z_{sv} \quad (64)$$

$$\eta = 1 - 0,059116 - 0,00423 = 0,93665$$

$$\eta = \mathbf{93,665 \text{ [\%]}}$$

8. Závěr

Tato bakalářská práce řeší spalování přebytků koksárenského plynu v teplárně Přívoz. Dále se zabývá úpravou kotle K2, pro který byly navrženy dvě varianty.

Předmětem 1. varianty je úprava stávajících kombinovaných hořáků za účelem dosažení jejich maximálního výkonu při spalování koksárenského plynu. Zbývající potřebný příkon do celkového požadovaného tepelného výkonu 40 MWt je realizován nově instalovanými hořáky.

2. varianta spočívá v zachování 3 stávajících kombinovaných hořáků bez jakýchkoliv úprav a instalaci 2 nových hořáků pouze na koksárenský plyn o vyšším výkonu do bočních stěn spalovací komory.

Varianta č. 1 nám v podstatě dává odpověď na otázku, jakého zvýšení výkonu lze dosáhnout úpravou stávajících čelních hořáků. I když byla tato varianta v bakalářské práci technicky zpracována, tak ve srovnání s druhým variantním návrhem úprav nenabízí žádnou technickou výhodu. Ani cenově není 1. varianta výhodnější, takže ji nedoporučuji k realizaci.

U varianty č. 2 byla prověřena možnost využití dvou starších výkonových hořáků z VMH (výtopna mariánské hory) pro spalování koksárenského plynu. Ale na základě výsledku tepelného příkonu tuto variantu č. 2A nedoporučuji.

Pro realizaci úprav zařízení doporučuji variantu č. 2B, která spočívá v instalaci dvou úplně nových hořáků pouze na koksárenský plyn o příkonu 2 x 15 MWt.

9. Použitá literatura

- [1] OCHRANA, L., Kadrnožka, J. *Teplárenství*. Brno : CERM, 2001. ISBN 80-7204-222-X.
- [2] ČERNÝ, V. *Spalovací zařízení a výměníky tepla*. Praha : ČVUT, 1988.
- [3] ČERNÝ, V., Janeba, B., Teyssler, J. *Parní kotle*. Praha : SNTL, 1983.
- [4] Sada obrázků od doc.Dr Ing.Bohumíra Čecha
- [5] ČSN 07 0302. *Přejímací zkoušky parních kotlů*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 56 s.
- [6] ČERNÝ, V. a kol. *Parní kotle a spalovací zařízení*. SNTL Praha, 1975.
- [7] KOLAT, P. *Přenos tepla a hmoty*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1986.
- [8] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Skripta ČVUT Praha, 2005.
- [9] Zprávy katedry energetiky z měření kotlů v Teplárně Přívoz.
- [10] Internetové stránky: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-vytapani/8382-kotle-1-cast>
- [11] Internetové stránky: http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/zakl_spal.pdf
- [12] Dokumentace společnosti Dalkia Česká republika, a.s.: *Popis zařízení*
- [13] Dokumentace společnosti Dalkia Česká republika, a.s.: *Technická studie*

10. Přílohy

- (1) Plynové schéma teplárny